

Міністерство освіти і науки України

Національний університет водного господарства та
природокористування

С. В. Василюк, К. С. Василюк

Техніка високих напруг

Навчальний посібник

Рекомендовано як навчальний посібник для здобувачів вищої освіти

Рівне 2018

УДК 621.3.048.1

B19

Рецензенти:

Мартинюк П. М., доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри Національного університету водного господарства та природокористування, м. Рівне;

Вовна О. В., доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри Державного вищого навчального закладу «Донецький національний технічний університет», м. Покровськ.

Рекомендовано вченою радою Національного університету водного господарства та природокористування.

Протокол № 6 від 26 жовтня 2018 р.

Василець С. В., Василець К. С.

B19 Техніка високих напруг: навчальний посібник [Електронне видання]. – Рівне : НУВГП, 2018. – 187 с.

ISBN 978-966-327-409-6

У навчальному посібнику викладено основи техніки високих напруг: проаналізовано особливості виникнення електричного розряду у вакуумі, газах, рідких та твердих діелектриках, грозові, комутаційні та квазістаціонарні перенапруги в електричних мережах, улаштування високовольтних ізоляційних конструкцій та випробувальних установок.

Посібник призначено для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Також може бути корисним під час самостійного освоєння техніки високих напруг.

УДК 621.3.048.1

ISBN 978-966-327-409-6

□ С. В. Василець, К. С. Василець, 2018

□ Національний університет водного господарства та природокористування, 2018

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| ВСТУП | 8 |
| РОЗДІЛ 1. ЕЛЕКТРИЧНИЙ РОЗРЯД У ВАКУУМІ, ГАЗАХ, РІДКИХ ТА ТВЕРДИХ ДІЕЛЕКТРИКАХ | 9 |
| 1.1. Загальні відомості щодо техніки високих напруг, мета і задачі курсу | 9 |
| 1.1.1. Стандартні рівні напруги в різних країнах..... | 9 |
| 1.1.2. Сфери використання високої напруги..... | 9 |
| 1.1.3. Визначення поняття «техніка високих напруг»..... | 13 |
| 1.1.4. Характеристика ізоляції електроустановок..... | 14 |
| 1.1.5. Пробій та перекриття ізоляції, їх наслідки в мережах з різними типами нейтралі..... | 14 |
| 1.1.6. Причини виникнення перенапруг..... | 18 |
| 1.1.7. Мета, предмет та задачі курсу..... | 20 |
| 1.1.8. Питання для самоперевірки..... | 21 |
| 1.2. Електричний розряд у вакуумі | 21 |
| 1.2.1. Визначення вакууму, приклади використання діелектричних властивостей вакууму..... | 21 |
| 1.2.2. Стадії розряду у вакуумі..... | 24 |
| 1.2.3. Вакуумний пробій, поверхня електродів та її вплив на вакуумний пробій..... | 24 |
| 1.2.4. Поняття щодо автоелектронної емісії, аналіз типів емісійних центрів, що призводять до пробію вакуумного проміжку..... | 26 |
| 1.2.5. Критерії вакуумного пробію..... | 27 |
| 1.2.6. Ініціювання вакуумного пробію плазмою..... | 28 |
| 1.2.7. Електричний вибух металу..... | 28 |
| 1.2.8. Вибухова електронна емісія..... | 29 |
| 1.2.9. Струм вакуумної іскри..... | 31 |
| 1.2.10. Питання для самоперевірки..... | 31 |
| 1.3. Електричний розряд у газах | 32 |
| 1.3.1. Загальні відомості щодо розряду в газах..... | 32 |
| 1.3.2. Аналіз залежності струму і напруги на газовому проміжку в процесі розряду..... | 32 |
| 1.3.3. Процес виникнення розряду в газі, електронна лавина..... | 34 |
| 1.3.4. Типи розрядів у газах..... | 35 |
| 1.3.5. Таунсендівський розряд, закон Пашена..... | 35 |
| 1.3.6. Стримерний розряд..... | 36 |
| 1.3.7. Корона та довгі іскри, ультракорона..... | 37 |
| 1.3.8. Струм іскри та зниження напруги на проміжку..... | 40 |
| 1.3.9. Вибухова емісія електронів, моделі опору іскри..... | 40 |
| 1.3.10. Питання для самоперевірки..... | 41 |

| | |
|---|-----------|
| 1.4. Електричний розряд у рідких діелектриках..... | 42 |
| 1.4.1. Класифікація рідких діелектриків, основні чинники, що впливають на пробій рідких діелектриків..... | 42 |
| 1.4.2. Вплив вологи та мікродомішок на пробій..... | 43 |
| 1.4.3. Вплив тиску..... | 44 |
| 1.4.4. Вплив температури..... | 45 |
| 1.4.5. Вплив тривалості дії напруги..... | 46 |
| 1.4.6. Вплив геометрії електродів, відстані між ними, матеріалу та полярності на пробивну напругу..... | 47 |
| 1.4.7. Бар'єрний ефект..... | 48 |
| 1.4.8. Питання для самоперевірки..... | 49 |
| 1.5. Електричний розряд у твердих діелектриках..... | 49 |
| 1.5.1. Види пробою твердого діелектрика..... | 49 |
| 1.5.2. Фізичні явища в діелектрику при впливі електричного поля..... | 51 |
| 1.5.2.1. Часткові розряди..... | 51 |
| 1.5.2.2. Накопичення об'ємного заряду..... | 54 |
| 1.5.2.3. Електролюмінесценція..... | 54 |
| 1.5.3. Старіння твердих діелектриків..... | 55 |
| 1.5.4. Питання для самоперевірки..... | 56 |
| РОЗДІЛ 2. ПЕРЕНАПРУГИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ..... | 57 |
| 2.1. Загальна характеристика перенапруг, грозові перенапруги..... | 57 |
| 2.1.1 Загальна характеристика перенапруг та засобів захисту від них..... | 57 |
| 2.1.2. Блискавка як джерело грозових перенапруг, етапи утворення блискавки..... | 59 |
| 2.1.3. Питання для самоперевірки..... | 63 |
| 2.2. Грозозахист об'єктів електроенергетики..... | 64 |
| 2.2.1. Блискавичники..... | 64 |
| 2.2.2 Зони захисту блискавичників різних типів..... | 65 |
| 2.2.3. Захисні апарати та пристрої..... | 66 |
| 2.2.3.1. Захисні проміжки..... | 67 |
| 2.2.3.2. Трубочасті розрядники..... | 69 |
| 2.2.3.3 Довгоіскрові розрядники..... | 71 |
| 2.2.3.4. Вентильні розрядники..... | 72 |
| 2.2.3.5. Магнітовентильні розрядники..... | 73 |
| 2.2.3.6. Нелінійні обмежувачі перенапруг..... | 74 |
| 2.2.4. Питання для самоперевірки..... | 75 |
| 2.3. Комутаційні перенапруги в електричних мережах..... | 76 |
| 2.3.1. Загальна характеристика комутаційних перенапруг..... | 76 |
| 2.3.2. Перенапруги перехідного процесу при ввімкненні розімкненої лінії..... | 77 |
| 2.3.3. Перенапруги перехідного процесу при автоматичному повторному ввімкненні..... | 80 |

| | |
|--|------------|
| 2.3.4. Перенапруги перехідного процесу при відключенні конденсаторів та ненавантажених ліній..... | 82 |
| 2.3.5. Перенапруги перехідного процесу при відключенні великих струмів..... | 87 |
| 2.3.6. Перенапруги при відключенні малих індуктивних струмів..... | 90 |
| 2.3.7. Перенапруги перехідного процесу при переміжних замиканнях на землю..... | 93 |
| 2.3.8. Обмеження комутаційних перенапруг..... | 97 |
| 2.3.8.1. Основні принципи побудови захисту від комутаційних перенапруг..... | 97 |
| 2.3.8.2. Класифікація заходів захисту..... | 98 |
| 2.3.8.3. Кероване ввімкнення повітряної лінії..... | 99 |
| 2.3.8.4. Програмоване ввімкнення лінії..... | 100 |
| 2.3.8.5. Застосування резисторів у вимикачах..... | 100 |
| 2.3.8.6. Нелінійні обмежувачі для захисту від перенапруг..... | 102 |
| 2.3.9. Питання для самоперевірки..... | 102 |
| 2.4. Квaziстаціонарні перенапруги..... | 103 |
| 2.4.1. Підвищення напруги в кінці розімкненої лінії..... | 103 |
| 2.4.2. Усталені перенапруги при однофазних коротких замиканнях..... | 109 |
| 2.4.3. Перенапруги промислової частоти при неповнофазних режимах роботи..... | 111 |
| 2.4.4. Ферорезонансні перенапруги..... | 114 |
| 2.4.5. Питання для самоперевірки..... | 117 |
| РОЗДІЛ 3. ВИСОКОВОЛЬТНІ ІЗОЛЯЦІЙНІ КОНСТРУКЦІЇ ТА ВИПРОБУВАЛЬНІ УСТАНОВКИ..... | 118 |
| 3.1. Координація ізоляції, ізоляція повітряних ліній електропередачі та відкритих розподільчих пристроїв..... | 118 |
| 3.1.1. Координація ізоляції..... | 118 |
| 3.1.2. Ізоляція повітряних ліній електропередачі..... | 120 |
| 3.1.3. Лінійні ізолятори..... | 120 |
| 3.1.4. Ізолятори та ізоляційні конструкції відкритого розподільчого пристрою..... | 125 |
| 3.1.5. Ізоляційні конструкції з газовою ізоляцією..... | 125 |
| 3.1.6. Питання для самоперевірки..... | 129 |
| 3.2. Ізоляція силових трансформаторів, силові конденсатори... | 129 |
| 3.2.1. Загальні відомості про ізоляцію силових трансформаторів..... | 129 |
| 3.2.2. Конструкція ізоляції трансформаторів..... | 131 |
| 3.2.3. Експлуатація ізоляції трансформаторів..... | 133 |
| 3.2.4. Конструкція силових конденсаторів..... | 134 |
| 3.2.5. Ізоляція силових конденсаторів..... | 137 |
| 3.2.6. Питання для самоперевірки..... | 138 |

| | |
|--|------------|
| 3.3. Силові електричні кабелі, ізоляція електричних машин високої напруги..... | 139 |
| 3.3.1. Загальна характеристика силових кабелів..... | 139 |
| 3.3.2. Основні конструкції кабелів високої напруги..... | 140 |
| 3.3.3. Випробування ізоляції кабелів..... | 143 |
| 3.3.4. Ізоляція електричних машин високої напруги..... | 144 |
| 3.3.5. Випробування ізоляції електричних машин..... | 146 |
| 3.3.6. Питання для самоперевірки..... | 147 |
| 3.4. Високовольтні випробувальні установки і методи проведення випробувань..... | 148 |
| 3.4.1. Загальна характеристика випробувань..... | 148 |
| 3.4.2. Випробувальні напруги промислової частоти..... | 149 |
| 3.4.3. Випробувальні трансформатори і методи випробування ізоляції напругою промислової частоти..... | 150 |
| 3.4.4. Випробувальні напруги комутаційних імпульсів..... | 153 |
| 3.4.5. Питання для самоперевірки..... | 154 |
| РОЗДІЛ 4. ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ..... | 155 |
| 4.1. Лабораторна робота № 1. Дослідження електричної дуги при розмиканні контактів однієї фази силового вимикача..... | 155 |
| 4.1.1. Опис віртуального лабораторного стенда..... | 155 |
| 4.1.2. Порядок виконання роботи..... | 156 |
| 4.1.3. Вміст звіту з лабораторної роботи..... | 159 |
| 4.1.4. Питання для самоперевірки..... | 159 |
| 4.2. Лабораторна робота № 2. Дослідження вольт-амперної характеристики дуги полюса високовольтного вимикача..... | 160 |
| 4.2.1. Опис віртуального лабораторного стенда..... | 160 |
| 4.2.2. Порядок виконання роботи..... | 161 |
| 4.2.3. Вміст звіту з лабораторної роботи..... | 163 |
| 4.2.4. Питання для самоперевірки..... | 163 |
| 4.3. Лабораторна робота № 3. Дослідження механізму часткового розряду в твердих діелектриках..... | 163 |
| 4.3.1. Опис віртуального лабораторного стенда..... | 163 |
| 4.3.2. Порядок виконання роботи..... | 165 |
| 4.3.3. Вміст звіту з лабораторної роботи..... | 166 |
| 4.3.4. Питання для самоперевірки..... | 167 |
| 4.4. Лабораторна робота № 4. Дослідження перехідних процесів в елементах електрообладнання при ударі блискавки..... | 167 |
| 4.4.1. Опис віртуального лабораторного стенда..... | 167 |
| 4.4.2. Порядок виконання роботи..... | 168 |
| 4.4.3. Вміст звіту з лабораторної роботи..... | 169 |
| 4.4.4. Питання для самоперевірки..... | 170 |
| 4.5. Лабораторна робота № 5. Дослідження комутаційних перенапруг при автоматичному повторному ввімкненні лінії.. | 170 |
| 4.5.1. Опис віртуального лабораторного стенда..... | 170 |
| 4.5.2. Порядок виконання роботи..... | 172 |

| | |
|---|------------|
| 4.5.3. Вміст звіту з лабораторної роботи..... | 174 |
| 4.5.4. Питання для самоперевірки..... | 174 |
| 4.6. Лабораторна робота № 6. Дослідження підвищення напруги в кінці розімкненої лінії..... | 175 |
| 4.6.1. Короткі теоретичні відомості..... | 175 |
| 4.6.2. Опис віртуального лабораторного стенда..... | 176 |
| 4.6.3. Порядок виконання роботи..... | 176 |
| 4.6.4. Вміст звіту з лабораторної роботи..... | 179 |
| 4.6.5. Питання для самоперевірки..... | 179 |
| Глосарій..... | 180 |
| Література..... | 186 |

ВСТУП

Метою навчальної дисципліни «Техніка високих напруг» є вивчення основ теорії електрофізичних процесів, що відбуваються в електротехнічних матеріалах при дії на них високих напруг та сильних електромагнітних полів, способів протидії негативному впливу грозових і комутаційних перенапруг на функціональні характеристики ізоляційних конструкцій високовольтного електрообладнання, координації і методів профілактичного контролю і випробування ізоляції різних типів енергетичного електрообладнання.

Завдання навчальної дисципліни «Техніка високих напруг»: вивчити взаємозв'язок між електричними властивостями основних видів ізоляції, рівнями перенапруг, що впливають на неї, і характеристиками захисної апаратури; вивчити електрофізичні процеси в ізоляції при її експлуатації; вміти оцінювати електричну міцність ізоляційних конструкцій; засвоїти основні методи й норми випробування ізоляції високовольтного електрообладнання; вивчити сучасні засоби боротьби з перенапругами у високовольтних електромережах.

В результаті вивчення даного курсу студент повинен знати: особливості розповсюдження електричного розряду в різних середовищах (вакуумі, газах, рідких та твердих діелектриках); умови виникнення перенапруг в електричних мережах та способи захисту; характеристики високовольтних ізоляційних конструкцій; високовольтні випробування та вимірювання. Крім того, студент повинен уміти: використовувати знання в галузі електроенергетики для математичного моделювання електроенергетичних об'єктів, систем та процесів в них; використовувати знання й практичні навички в галузі механіки, фізики та електротехніки для дослідження фізичних явищ і процесів в електрообладнанні; використовувати знання, уміння й навички в галузі теорії й практики функціонування електричних станцій, мереж, систем автоматичного керування для управління режимами електроенергетичних об'єктів та систем; використовувати знання в галузі сталих та перехідних процесів для попередження та ліквідації аварійних ситуацій в електроенергетичних системах та об'єктах.

РОЗДІЛ 1. ЕЛЕКТРИЧНИЙ РОЗРЯД У ВАКУУМІ, ГАЗАХ, РІДКИХ ТА ТВЕРДИХ ДІЕЛЕКТРИКАХ

1.1. Загальні відомості щодо техніки високих напруг, мета і задачі курсу

Стандартні рівні напруги в різних країнах. Сфери використання високої напруги. Визначення поняття «техніка високих напруг». Характеристика ізоляції електроустановок. Пробій та перекриття ізоляції, їх наслідки в мережах з різними типами нейтралі. Причини виникнення перенапруг. Мета, предмет та задачі курсу.

1.1.1. Стандартні рівні напруги в різних країнах

Міжнародна електротехнічна комісія (МЕК, ІЕС), ряд національних та міжнародних стандартів (ІЕТ, ІЕЕЕ тощо) використовує найменування рівнів напруги, що наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Найменування рівнів напруги

| Напруга (згідно зі стандартом ІЕС 60038) | Для змінного струму (діюче значення) | Для постійного струму |
|---|---|--------------------------|
| занизька (Extra-low voltage, ELV) | нижче 50 В | нижче 120 В |
| низька (Low voltage, LV) | 50÷1000 В | 120÷1500 В |
| висока (High voltage, HV) | вище 1000 В | вище 1500 В |

Стандартними для України є рівні напруги 0,38; 6; 10; 35; 110; 150, 220, 330, 400, 500, 750 кВ змінної напруги та 800 кВ постійної напруги (± 400 кВ), див. рис. 1.1.

У США використовуються рівні напруги 33, 115, 138, 161, 230, 345, 500 кВ змінної напруги.

У Європі - 33, 132, 150, 220, 300-330, 380-400, 500, 750 кВ змінної напруги.

В деяких країнах використовуються нестандартні рівні, наприклад 275 кВ у Великій Британії або 450 кВ для міждержавних ліній, що пов'язують скандинавські країни з континентальною Європою.

Головною причиною різних стандартних рівнів напруги у різних країнах є нерівномірне збільшення напруги з розвитком енергетики при початковій ізолюваності енергосистем.

1.1.2. Сфери використання високої напруги

Висока напруга використовується для передачі електроенергії на великі відстані, рис. 1.1. Основна перевага високої напруги при передачі електричної енергії полягає у збільшенні потужності, що передається, за рахунок зменшення втрат в лініях електропередачі. Потужність, що передається, зростає пропорційно квадрату номінальної напруги.

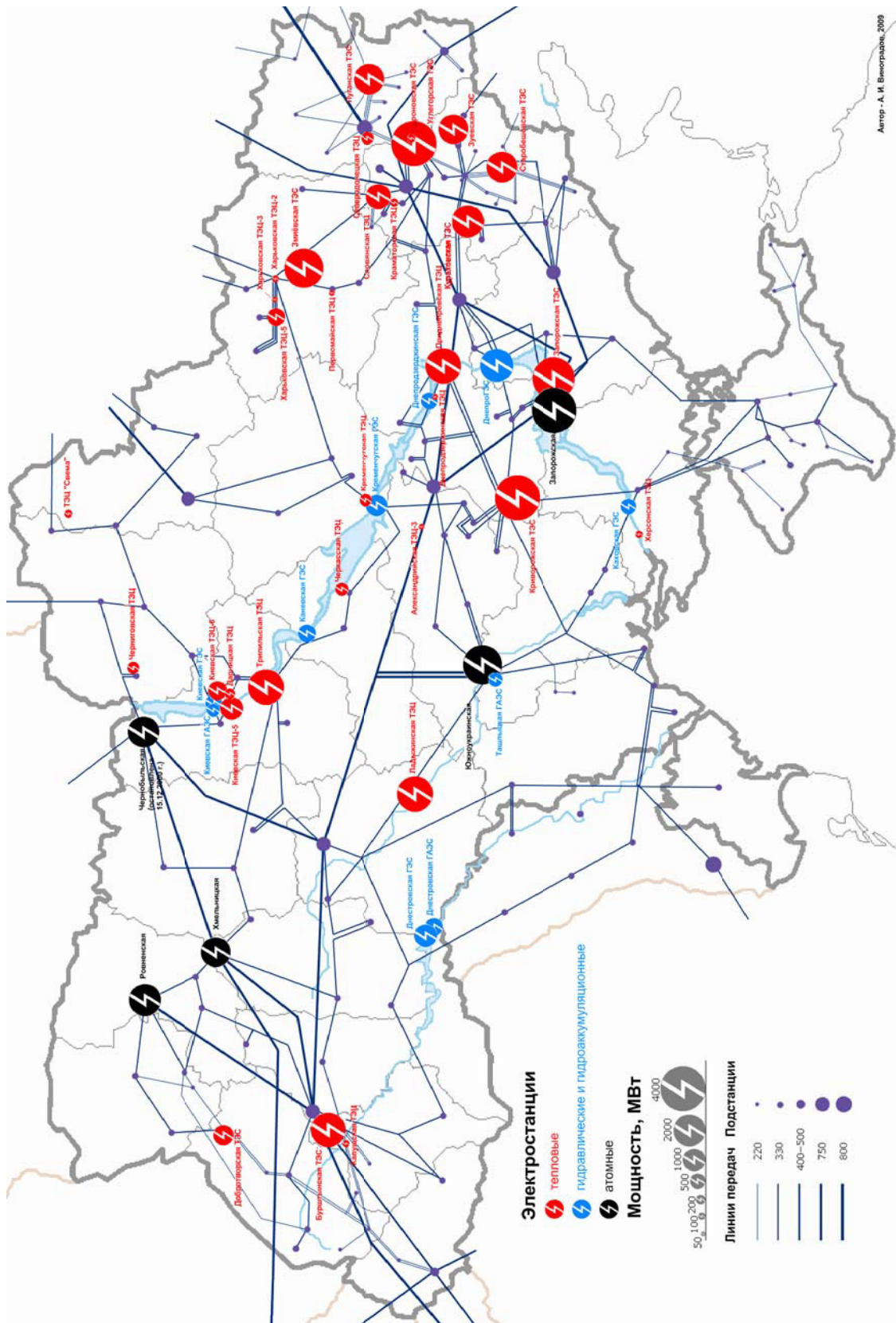


Рис. 1.1.1. Структурна схема енергосистеми України

Як приклад використання ліній електропередач високої напруги розглянемо спрощену схему енергосистеми, що наведена на рис. 1.2. Електрична енергія, що виробляється двома електростанціями різних типів: тепловою електростанцією (ТЕС) та теплоелектроцентральною (ТЕЦ), – передається віддаленим споживачам. Для передачі електроенергії на відстань використовуються повітряні лінії електропередач (рис. 1.3). На електростанціях напругу підвищують спеціальними підвищувачими трансформаторами, передають при високій напрузі, а у споживачів напругу понижують знижуючими трансформаторами (рис. 1.4).

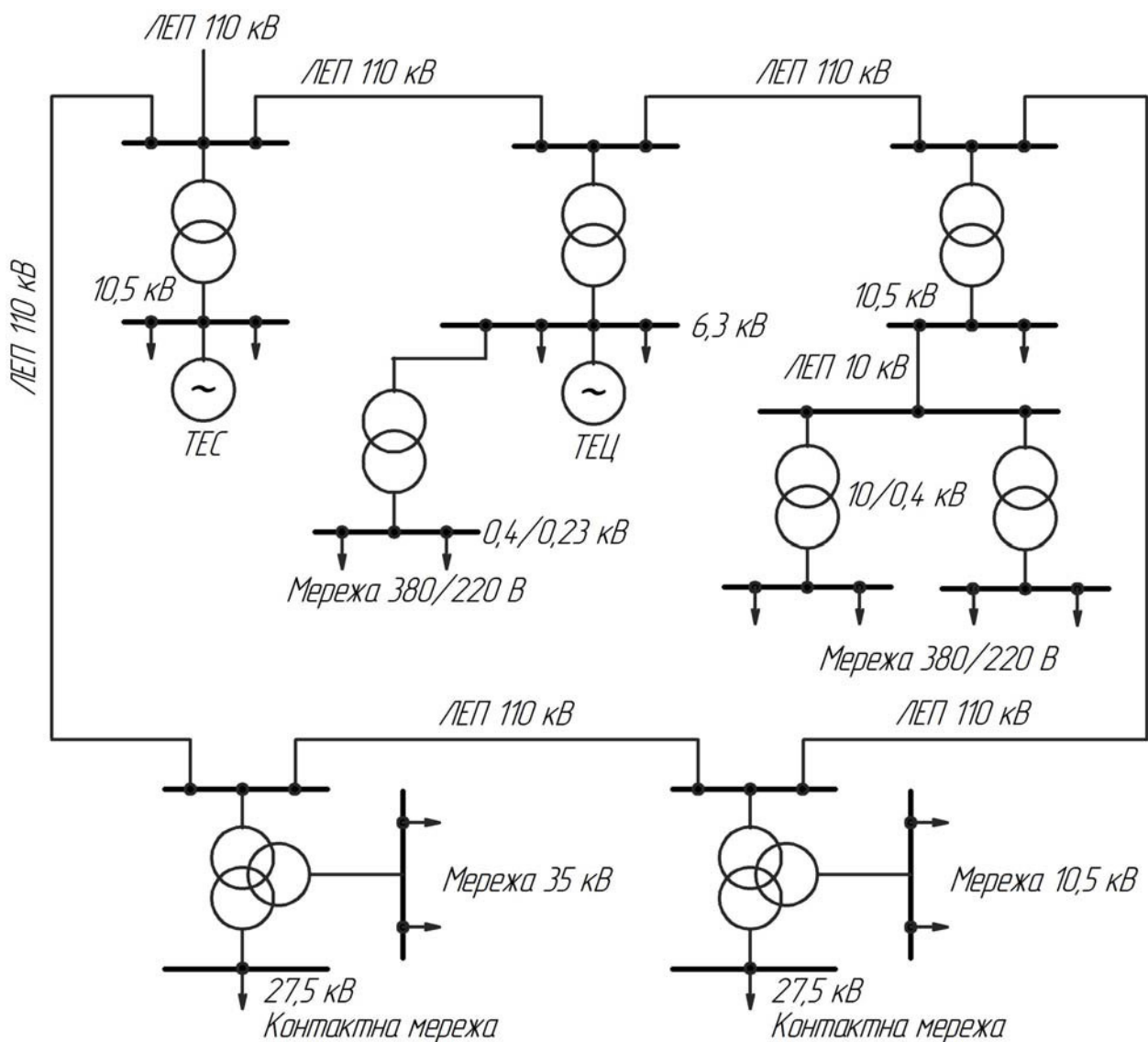


Рис. 1.2. Спрощена однолінійна схема енергосистеми



Рис. 1.3. Високовольтні лінії електропередач



Рис. 1.4. Високовольтний силовий трансформатор

Висока напруга також широко використовується в електротехнологіях: в електротермічних установках металургійного виробництва (рис. 1.5), для осадження часток в сильному електричному полі (при фарбуванні та покритті поверхонь), для створення електрофільтрів, при використанні сильних електричних та магнітних полів для обробки матеріалів, дроблення гірничих порід, для очистки води, знезараження органічних середовищ тощо.



Рис. 1.5. Дугова сталеплавильна піч
(шихта плавиться високовольтною електричною дугою)

Використання високих напруг в електричних схемах потребує розв'язання складних науково-технічних проблем. Одна з центральних проблем, що стосується електричної ізоляції, отримала назву «Техніка високих напруг в енергетиці» і передбачає як дослідження фізичних процесів в ізоляції, так і дослідження форм та величин напруг, що впливають на ізоляцію під час експлуатації. Надійне функціонування ізоляції всіх елементів схеми є запорукою безаварійної роботи енергосистеми.

1.1.3. Визначення поняття «техніка високих напруг»

Техніка високих напруг являє собою комплекс дисциплін, що вивчають вплив сильних електричних та магнітних полів на речовину та питання їх технічного використання. Серед цих дисциплін: методи розрахунку електричних та магнітних полів, електричні розряди в газах, твердих та рідких діелектриках, електрогазодинаміка дисперсних систем, високовольтні установки та вимірювальні пристрої, ізоляційні конструкції, перехідні процеси та перенапруги в електроустановках.

1.1.4. Характеристика ізоляції електроустановок

Ізоляція електроустановок поділяється на зовнішню та внутрішню. До зовнішньої ізоляції відносяться повітряні проміжки (наприклад, між провідниками ліній електропередач, між провідниками та опорою) та частини ізоляційних конструкцій, що контактують з повітрям. Внутрішня ізоляція знаходиться всередині корпуса трансформатора, електричного апарата, кабельної оболонки тощо (рис. 1.6) Внутрішня ізоляція складається з комбінації рідких, твердих та газоподібних діелектриків.



Рис. 1.6. Структура броньованого кабелю ААБл (6, 10 кВ):

- 1 – струмопровідна жила; 2 – паперова ізоляція жил; 3 – поясна ізоляція;
- 4 – внутрішня алюмінієва оболонка; 5 – підкладка під броню;
- 6 – броня, що складається з двох сталевих стрічок;
- 7 – захисна зовнішня оболонка

1.1.5. Пробій та перекриття ізоляції, їх наслідки в мережах з різними типами нейтралі

Під впливом великих напруженостей електричного поля, що можуть виникати під час експлуатації, та через вплив зовнішнього середовища можлива часткова або повна втрата ізоляцією її діелектричних властивостей – пробій ізоляції. Також може виникати перекриття ізоляції – розряд по поверхні ізоляційного матеріалу. Характер ушкоджень та його наслідки є різними для зовнішньої та внутрішньої ізоляції (рис. 1.7-1.10).



Рис. 1.7. Міжфазне коротке замикання в з'єднувальній муфті

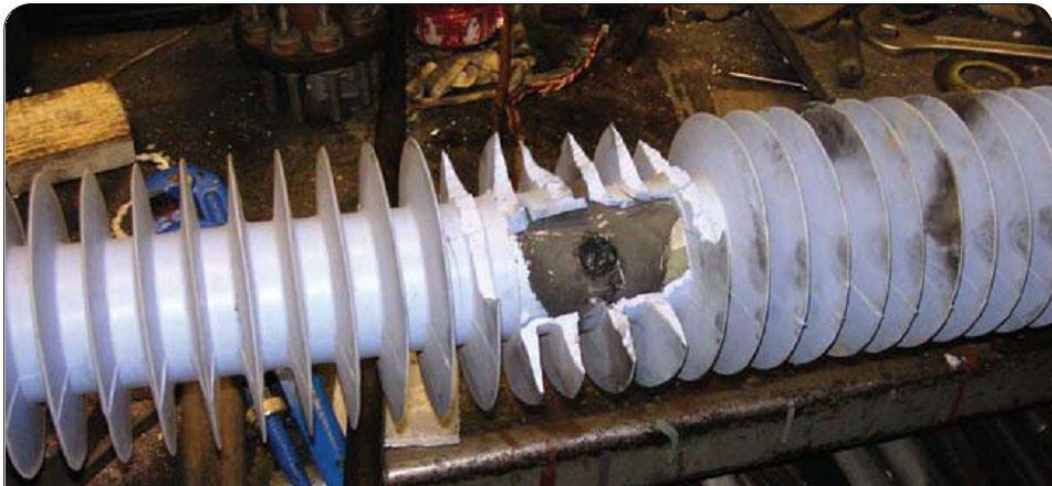


Рис. 1.8. Пропалювання та пробій полімерного ізолятора на роз'єднувачі 110 кВ



Рис. 1.9. Демонтований обмежувач перенапруг після пробою та вигорання ізоляції



Рис. 1.10. Пошкоджений кабель напругою 6 кВ

Після пробою повітряного проміжку або перекриття вздовж поверхні ізолятора та усунення причини пробою електрична міцність повітря повністю відновлюється. Небажані наслідки пробою повітря – можливість виникнення стійкої дуги (рис. 1.11-1.12).



Рис. 1.11. Замикання на ЛЕП 110 кВ



Рис. 1.12. Однофазне замикання в мережі 110 кВ (через дерево)

На лініях електропередач дугове замикання на землю або між дротами призводить до відключення лінії на час, необхідний для відновлення ізоляції. Отже, пробій повітряної ізоляції пов'язаний з короткочасною перервою електропостачання, але не з ушкодженням ізоляції. У протилежність цьому порушення електричної міцності внутрішньої ізоляції є безповоротним процесом, що призводить до відмови дорогої апаратури.

Можливість ліквідації дугових замикань на землю, що являють собою найбільш поширений вид порушень нормальної роботи мережі, залежить від способу заземлення нейтралі.

При роботі мережі з ізолюваною нейтраллю через місце однофазного замикання на землю протікає ємнісний струм непошкоджених фаз (рис. 1.13, *a*). В мережах невеликої довжини, що мають незначні ємнісні струми, дуга згасає

при першому проходженні струму через нуль і нормальна робота електромережі відновлюється без відключення пошкодженої ділянки мережі. Тобто більшість однофазних замикань на землю виявляються безпечними.

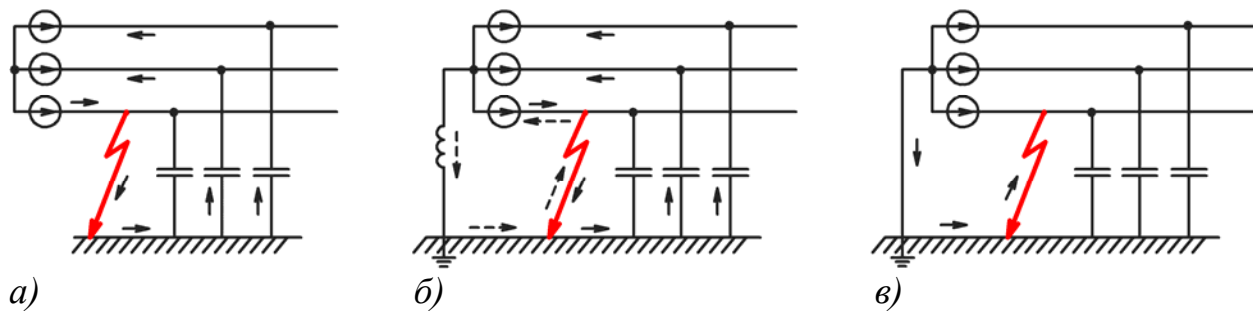


Рис. 1.13. Однофазне замикання на землю в мережі з ізольованою (а), компенсованою (б) та глухозаземленою (в) нейтраллю

Підвищення довжини мережі супроводжується збільшенням ємнісних струмів, що призводить до затяжного горіння дуги, розвитку коливань через її нестійкий характер, можливості перекидання дуги на суміжні фази. Для полегшення умов гасіння дуги в нейтраль трансформаторів включають реактори з великою індуктивністю – дугогасний реактор (котушка Петерсена), рис. 1.14. В разі однофазного замикання на землю індуктивний струм котушки компенсує ємнісний струм, в результаті чого струм замикання на землю суттєво зменшується (рис. 1.13, б). Це призводить до згасання дуги та відновлення нормального режиму роботи.



Рис. 1.14. Дугогасний реактор для мереж 6 кВ, 10 кВ та 35 кВ

В мережах із заземленою нейтраллю (рис. 1.13, в) струм однофазного короткого замикання викликає спрацювання релейного захисту та селективне відключення пошкодженої ділянки мережі. Завдяки швидкому

відключенню дуга не встигає перекинутися на інші фази або пошкодити ізоляцію. Тому лінія може бути ввімкнена в роботу через долі секунди, що використовуються в різних системах автоматичного повторного ввімкнення (АПВ).

В нашій країні найчастіше мережі напругою до 35 кВ включно функціонують з ізолюваною нейтраллю, в мережах 110 кВ та вище нейтраль глухо заземлюють.

Оскільки ізоляція постійно знаходиться під робочою напругою, а також зазнає механічних, термічних та інших впливів, то вона (за виключенням повітряних проміжків) з часом втрачає свої первинні властивості, знижується її електрична міцність – ізоляція старіє. Необхідно, щоб протягом строку служби установки, тривала міцність ізоляції не знизилась до величини найбільшої робочої напруги установки.

1.1.6. Причини виникнення перенапруг

Під час експлуатації на ізоляцію впливає не тільки робоча напруга. В електроустановках виникають короточасні суттєві підвищення напруги – **перенапруги**.

Перенапруги поділяються на дві групи:

- грозові перенапруги, що пов'язані з розрядами блискавки в струмопровідні частини установки або в землю поблизу неї;
- внутрішні перенапруги, які виникають в результаті різноманітних нормальних або аномальних комутацій в системі.

Розряд блискавки в ізолюваний від землі дріт супроводжується появою на дроті напруги, прямо пропорційної амплітуді струму блискавки, тривалість якої не перевищує 50-100 мкс. Безпосередні виміри показують, що розряди блискавки можуть супроводжуватися струмами від декількох кілоампер до 200кА і більше, тобто струм блискавки є статистичною величиною, що характеризується певним законом розподілу імовірності. У зв'язку з цим напруга на ізоляції дроту при розряді блискавки також є статистичною величиною. Встановлено, що напруга більше 1000 кВ з'являється на ізоляції приблизно в 70% усіх випадків розряду блискавки в дріт. Напругу 1000 кВ може витримувати ізоляція далеко не всіх ліній електропередачі, але навіть якщо ізоляція і витримає, лінії не можуть нормально працювати без спеціальних заходів щодо зниження грозових перенапруг.

Добре відомим засобом грозозахисту є блискавичник – надійно заземлені металеві стержні або дроти, розташовані поблизу об'єкту, що захищається. Переважна більшість розрядів блискавки потрапляють в блискавичник, минувши об'єкт, і струм блискавки відводиться в землю. Зокрема, на лініях високої напруги в якості блискавичників використовують заземлені дроти (грозозахисні троси), що підвішуються на опорах вище за фазові дроти (рис. 1.15). Застосування тросів різко зменшує напругу на ізоляції, але не зводить до нуля. Тому при ударах блискавки в лінію електропередачі, захищену тросами, є деяка імовірність ушкодження ізоляції, проте ця імовірність значно менша, ніж для ліній без тросів.

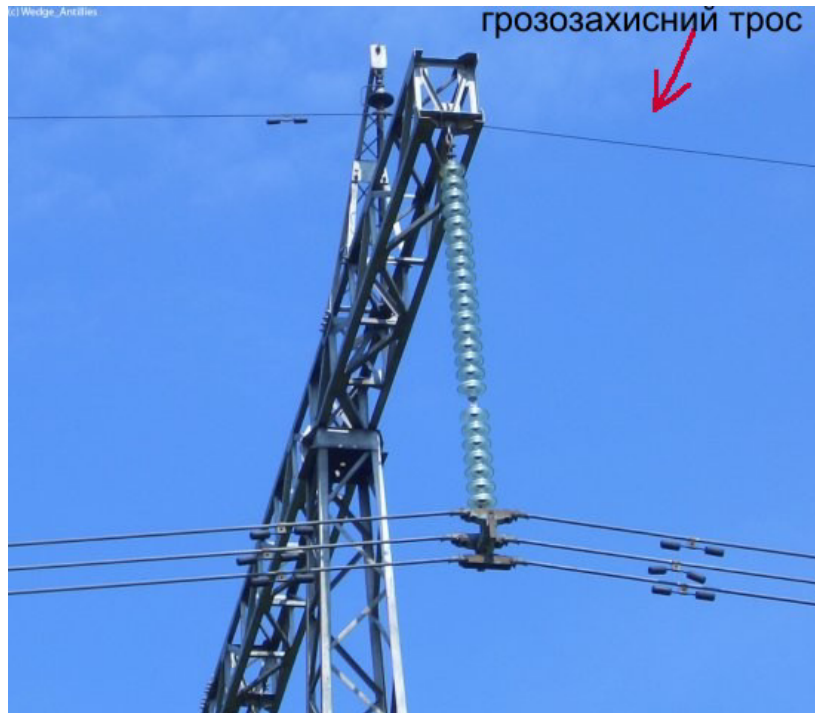


Рис. 1.15. Грозозахисний трос на опорі лінії електропередачі

Оскільки при перекритті ізоляції лінії або ударі в дріт повз трос (що також не виключається повністю) на дротах виникає висока напруга, утворюються блукаючі хвилі, які поширюються по дротах в обидві сторони від місця удару блискавки і врешті-решт досягають підстанцій, впливаючи на ізоляцію їх устаткування. Оскільки ушкодження ізоляції підстанцій є набагато серйознішою аварією, ніж пошкодження ізоляції ліній, необхідно приймати додаткові заходи для обмеження імовірності таких ушкоджень. Ці функції виконують спеціальні апарати, які називаються грозозахисними розрядниками і складаються з повітряного іскрового проміжку, послідовно сполученого з нелінійним активним резистором (рис. 1.16). Електрична міцність ізоляції підстанції повинна з певним запасом перевищувати залишкову напругу, яка, таким чином, має велике значення при розробці і виборі ізоляційних конструкцій.

Внутрішні перенапруги в електричних системах пов'язані з різними комутаціями (включення і відключення ліній або трансформаторів, замикання на землю або між фазами, відключення, короткі замикання тощо).

Внутрішні перенапруги залежать не лише від виду комутації, але і від параметрів мережі, характеристик комутаційного апарату і ряду інших чинників. При багатократному повторенні однієї і тієї ж комутації в системі кожного разу виникають різні перенапруги. Таким чином, внутрішні перенапруги, так само як і грозові, носять статистичний характер.

Внутрішні перенапруги можуть в 3-3,5 разів перевищувати фазну напругу установки. Як правило, ізоляція установок до 220 кВ включно таку напругу витримує. При вищій номінальній напрузі, коли економічно недоцільно створювати такі великі запаси міцності, широко застосовуються різні способи

обмеження перенапруг, зокрема – використовуються спеціальні типи розрядників.

Таким чином, поведінка ізоляції повинна розглядатися не лише при тривалій дії напруги промислової частоти, але і при короткочасних впливах грозових і внутрішніх перенапруг.



Рис. 1.16. Грозозахисні розрядники

Оцінка можливих перенапруг з урахуванням їх статистичного характеру, вибір захисних засобів і ізоляційних конструкцій – усі ці питання тісно пов'язані між собою. Комплексне розв'язання цих питань, тобто узгодження характеристик захисних пристроїв і характеристик ізоляції, що забезпечує високу надійність роботи ізоляції, називається **координацією ізоляції**. Наприклад, електрична міцність устаткування підстанції скоординована з пробивною та залишковою напругою розрядників.

При вирішенні питань координації ізоляції не завжди слід домагатися повного неушкодження ізоляції, достатньо незначної імовірності ушкодження. Оптимальні умови захисту від перенапруг і координації ізоляції повинні вибиратися в результаті техніко-економічного розрахунку, тобто шляхом обліку різних витрат: з одного боку, на посилення захисних пристроїв, що знижують імовірність аварії через ушкодження ізоляції; з іншого боку, на ремонт пошкодженого устаткування і через недовідпуск енергії.

1.1.7. Мета, предмет та задачі курсу

Таким чином, **метою** курсу «Техніка високих напруг» є вивчення основ теорії електрофізичних процесів, що відбуваються в електротехнічних

матеріалах при дії на них високих напруг та сильних електромагнітних полів, способів протидії негативному впливу грозових і комутаційних перенапруг на функціональні характеристики ізоляційних конструкцій високовольтного електрообладнання, координації і методів профілактичного контролю і випробування ізоляції різних типів енергетичного електрообладнання.

Предметом вивчення дисципліни є процеси у діелектричних матеріалах та елементах електромереж при тривалій дії високих напруг та короткочасних перенапругах.

Задачі курсу:

- вивчити взаємозв'язок між електричними властивостями основних видів ізоляції, рівнями перенапруг, що впливають на неї, і характеристиками захисної апаратури;
- вивчити електрофізичні процеси в ізоляції при її експлуатації;
- вміти оцінювати електричну міцність ізоляційних конструкцій;
- засвоїти основні методи й норми випробування ізоляції високовольтного електрообладнання;
- вивчити сучасні засоби боротьби з перенапругами у високовольтних електромережах.

1.1.8. Питання для самоперевірки

1. Які стандартні рівні напруг використовуються в різних країнах?
2. Що розуміють під поняттям «техніка високих напруг»?
3. Проаналізувати сфери використання високої напруги.
4. В чому полягає різниця між пробом та перекриттям ізоляції?
5. Які причини викликають виникнення перенапруг?

1.2. Електричний розряд у вакуумі

Визначення вакууму, приклади використання діелектричних властивостей вакууму. Стадії розряду у вакуумі. Вакуумний пробій. Поверхня електродів та її вплив на вакуумний пробій. Поняття щодо автоелектронної емісії. Аналіз типів емісійних центрів, що призводять до пробую вакуумного проміжку. Критерій вакуумного пробую. Ініціювання вакуумного пробую плазмою. Електричний вибух металу. Вибухова електронна емісія. Струм вакуумної іскри.

1.2.1. Визначення вакууму, приклади використання діелектричних властивостей вакууму

В якості ізолятора в високовольтній техніці можуть виступати: вакуум, газ, рідкий або твердий діелектрики. Розглянемо діелектричні властивості вакууму.

В техніці та прикладній фізиці під вакуумом розуміють середовище, які містить газ при тиску, що є суттєво меншим від атмосферного. В електроенергетиці широко використовують діелектричні властивості вакуумного середовища та його здатність швидко відновлювати електричну

міцність після розряду. Вакуум використовується як ізолятор у вакуумних конденсаторах, електростатичних генераторах, вакуумних комутаційних апаратах, зокрема широко використовуються вакуумні вимикачі, розрядники, реле. Такі пристрої здатні комутувати великі струми за коротких час, відрізняються невеликими габаритами, високою надійністю. Розглянемо більш детально в якості прикладу вакуумний вимикач.

Вакуумний вимикач – високовольтний вимикач (до 220 кВ включно), в якому вакуум використовується як середовище для гасіння електричної дуги (рис. 1.17). При розмиканні контактів, що знаходяться в вакуумі, дуга згасає після першого переходу струму через нуль і повторного не запалюється.



Рис. 1.17. Вакуумний вимикач 6-10 кВ

Розроблення вакуумних вимикачів супроводжувалося необхідністю розв'язання питань щодо:

- підтримання глибокого вакууму у герметизованій камері;
- відшукування ефективного способу попередження небезпечних комутаційних перенапруг;
- розподілення напруги та забрудненням внутрішніх поверхонь ізоляційних деталей парами металу при осадженні та ін.

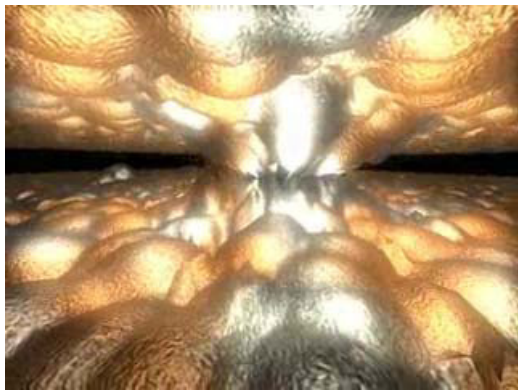
Механізм відключення вакуумного вимикача полягає в наступному (рис. 1.18). В момент розмикання контактів в вакуумному проміжку струм, що комутується, ініціює виникнення електричного розряду – вакуумної дуги, існування якої підтримується за рахунок металу, що випаровується з поверхні контактів до вакуумного проміжку. Плазма, утворена іонізованими парами металу, проводить електричний струм, тому струм протікає між контактами до моменту його переходу через нуль.



1



2



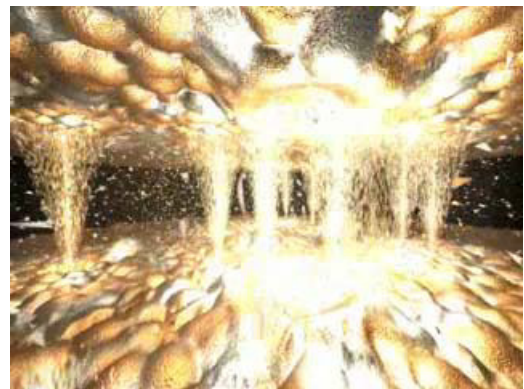
3



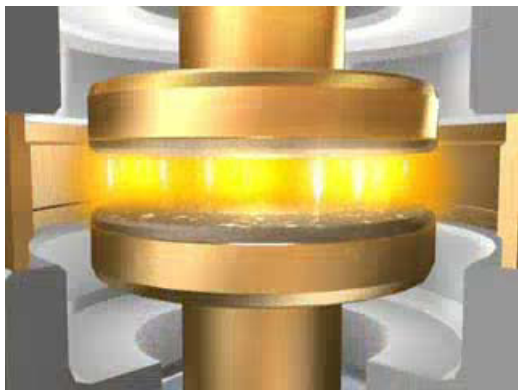
4



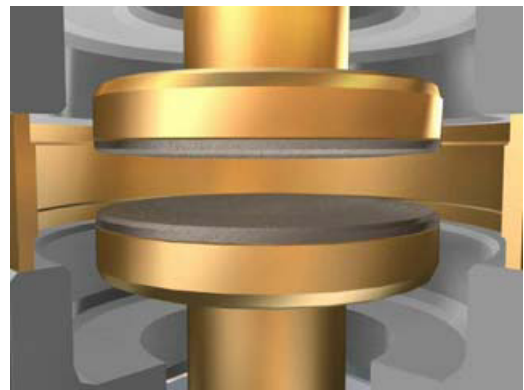
5



6



7



8

Рис. 1.18. Стадії розмикання контактів вакуумного вимикача

В момент переходу струму через нуль дуга згасає, а пари, що лишилися, миттєво (за 7-10 мкс) конденсуються на поверхні контактів та інших деталях дугогасної камери, відновлюючи електричну міцність вакуумного проміжку. В той же час на розведених контактах відновлюється прикладена до них напруга.

Розглянемо механізм виникнення розряду у вакуумі більш детально.

1.2.2. Стадії розряду у вакуумі

Розряд у вакуумі, як і будь-який інший розряд, складається з трьох стадій: пробою, іскри і дуги.

Пробій – це сукупність явищ, які порушують електричну ізоляцію вакуумного проміжку. Для вакуумного розряду це процеси, що призводять до концентрації в мікрооб'ємі катода енергії, достатньої для його вибуху.

Іскра – це сукупність процесів, що самопідтримуються, внаслідок яких росте струм у вакуумному проміжку. Для вакуумної іскри це процеси, що відбуваються при вибуховій електронній емісії (ВЕЕ). Одним з фундаментальних процесів в іскрі є утворення порцій електронів, що дістали назву ектонів, які виникають в процесі мікробибухів на катоді і створюють вибухову електронну емісію.

Дуга – це кінцева стадія розряду з відносно малим падінням напруги і стаціонарним струмом, який визначається параметрами розрядного кола і прикладеною напругою.

Великий інтерес являє розряд по поверхні діелектрика у вакуумі. Наявність діелектрика у вакуумному проміжку істотно ускладнює картину розряду. Важливу роль починає грати контакт діелектрика і катода, в якому велике значення мають потрібні точки: метал-діелектрик-вакуум. У цих точках істотно полегшується вибухова електронна емісія. Картина розряду ускладнюється також такими явищами, як вторинна електронна емісія з діелектрика, зарядка поверхні діелектрика, а також десорбція газу з неї.

1.2.3. Вакуумний пробій, поверхня електродів та її вплив на вакуумний пробій

Для досягнення найбільш можливої електричної міцності вакуумної ізоляції поверхня електродів, особливо катода, має бути чистою і гладкою. Проте досягти ідеально чистої і гладкої поверхні практично неможливо через наступні причини.

При механічній обробці поверхні електродів відбувається руйнування зерен кристалічної структури металу і утворюється аморфний шар, в якому можуть бути вкраплення абразивних матеріалів і карбідів, що з'являються під дією високих температур внаслідок тертя. Крім того, на поверхні металу є продукти різних хімічних реакцій. При цьому нормальна кристалічна структура, залежно від сорту металу і його обробки, знаходиться на глибині 1-100 мкм.

Якщо після механічної обробки електроди піддати електролітичній поліровці, то знімається верхній аморфний шар і оголюється кристалічна структура металу. При електролітичній поліровці відбувається переважне

розчинення виступаючих частин, тому вдається отримувати гладкі поверхні. Наприклад, на монокристалах алюмінію після електролітичної обробки можна отримати середній розмір нерівностей близько 1000 нм. Проте електролітична поліровка не гарантує повної відсутності виступів з розмірами кінчика в долі мікрона.

Значні зміни мікрорельєфу поверхні металу спостерігаються при його нагріванні і охолодженні. При нагріванні відбувається зменшення поверхневої енергії металу за рахунок виходу граней кристалів з меншим поверхневим натяженнями. Появі мікронерівностей на електродах сприяють також випаровування і конденсація, рекристалізація, фазові перетворення тощо. Швидке охолодження заздалегідь нагрітих зразків металу призводить до появи на поверхні виступів у вигляді складних голчастих візерунків.

Тривала дія напруги істотно спотворює мікрорельєф поверхні. При цьому залежно від сорту металу, наявності забруднень на поверхні, її температури і напруженості електричного поля можуть відбуватися такі процеси, як поверхнева дифузія, перебудова в електричному полі, випаровування, десорбція полем, міграція забруднень тощо.

На рис. 1.19 наведені приклади порушення ідеальної структури поверхні. Усі ці порушення поверхні створюють емісійні центри, які в результаті первинних або вторинних процесів призводять до вакуумного пробою.

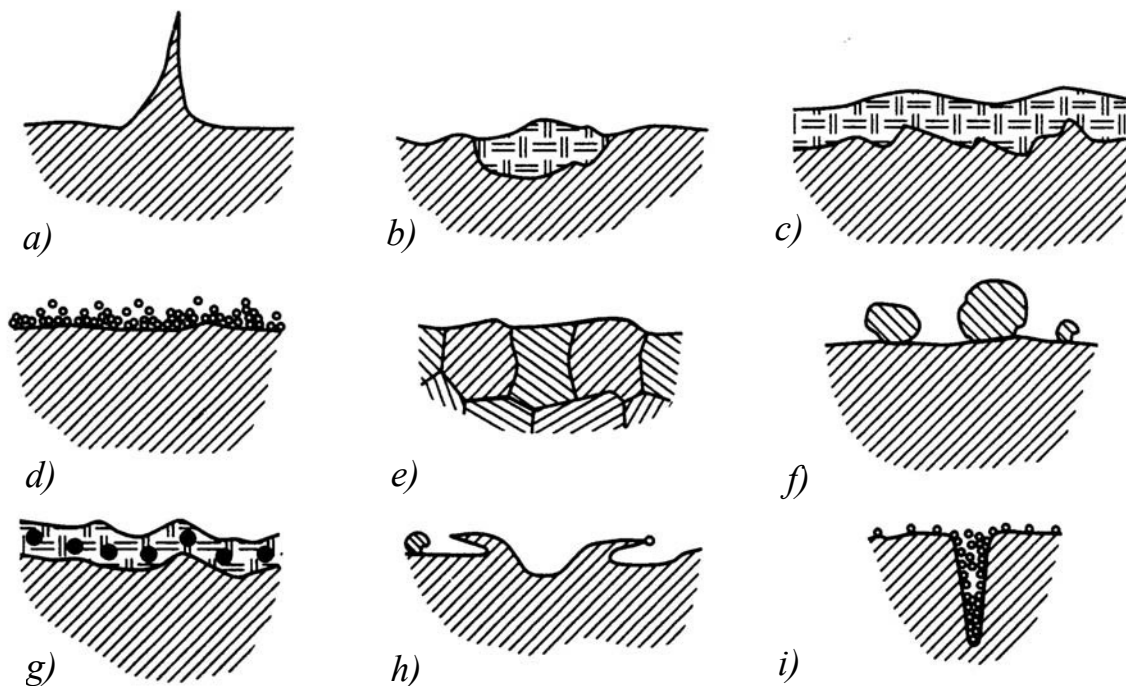


Рис. 1.19. Різні типи емісійних центрів, що призводять до пробою вакуумного проміжку: *a* – мікровиступи; *b* – діелектричні включення; *c* – оксидні та інші неорганічні електричні плівки; *d* – шари адсорбованого газу; *e* – вихід на поверхню міжзеренних границь; *f* – мікрочастки; *g* – продукти крекінга парів оливи; *h* – кромки кратерів, що утворилися в результаті пробойів; *i* – пори та тріщини

1.2.4. Поняття щодо автоелектронної емісії, аналіз типів емісійних центрів, що призводять до пробою вакуумного проміжку

Важливу роль в ініціюванні пробою грає автоелектронна емісія з мікроскопічних виступів на катоді. Це явище полягає в ефекті тунелювання електронів в сильному електричному полі крізь потенційний бар'єр на межі метал-вакуум.

Автоелектронна емісія (холодна, тунельна, електростатична, польова емісія) – випромінювання електронів з катода під дією зовнішнього електричного поля. При автоелектронній емісії електрони проникають крізь потенційний бар'єр, який існує на поверхні катода.

Основна залежність автоелектронної емісії зв'язує щільність її струму j з напруженістю електричного поля E на поверхні металу і називається формулою Фаулера-Нордгейма:

$$j = 1,55 \cdot 10^{-6} \frac{E^2}{t^2(y)\varphi} \exp \left[-\frac{6,85 \cdot 10^7 \varphi^{3/2}}{E} \theta(y) \right], \quad (1.1)$$

де φ – робота виходу металу, еВ (електрон-вольт); j – щільність струму автоелектронної емісії, А/см²; E – напруженість електричного поля, В/см; $t(y)$ та $\theta(y)$ – функції величини y , причому:

$$y = 3,62 \cdot 10^{-4} E^{1/2} \varphi^{-1}. \quad (1.2)$$

Із формули (1.1) можна встановити, що залежність $\frac{\lg j}{E^2} = f(E^{-1})$ є прямою лінією. Однак це справедливо лише при щільностях струму автоелектронної емісії $j \leq 10^8$ А/см². При більш високих щільностях функція $j(E)$ майже не залежить від роботи виходу металу φ . Причина цього ефекту пов'язана з впливом об'ємного заряду електронів поблизу емітера. Залежність $j(E)$ в цьому випадку визначається законом Чайлда-Ленгмюра:

$$j = \frac{4}{9} \varepsilon_0 \sqrt{\frac{2e}{m}} E^{3/2} \gamma_E r_e^{-1/2}, \quad (1.3)$$

де e та m – заряд та маса електрона; ε_0 – діелектрична стала; r_e – радіус поверхні, що емітує; γ_E – коефіцієнт, що визначається розміром та формою емітера, має величину порядку одиниці.

Однією з основних причин вакуумного пробою є струм автоелектронної емісії з мікрровиступів на поверхні катода. Оскільки електричне поле на їх кінчиках збільшується на багато разів порівняно з середнім полем, вводять поняття коефіцієнта підсилення електричного поля β_E . Він являє собою відношення дійсного значення напруженості електричного поля на вершині виступу до її середнього макроскопічного значення $E_{cp} = U/d$, де U – напруга на зазорі, d – відстань між електродами. Для випадків простих геометричних форм виступів знайдено зв'язок між коефіцієнтом β_E та параметрами неоднорідності. Наприклад, для еліпсоїда (для діапазону $\beta_E = 7 \div 100$):

$$\beta_E = \frac{ah}{r} + 1, \quad (1.4)$$

де h та r – висота та радіус вершини мікроступу відповідно; a – коефіцієнт, близький до одиниці.

1.2.5. Критерій вакуумного пробою

Важливу роль для характеристики вакуумного пробою грають критерії пробою. Існують два основні критерії: для імпульсної та постійної напруги. Розглянемо критерій вакуумного пробою для постійної напруги.

Для вакуумних проміжків довжиною від 10^{-4} см до 1 см при постійній напрузі встановлено, що для таких металів, як Al, Cu, Au, Pt, Mo, W та ін. величина пробивної напруженості електричного поля не залежить від довжини проміжку. Наприклад, для вольфраму пробивна напруженість становить $(6,5 \pm 1) \cdot 10^7$ В/см (рис. 1.20). Відповідно до залежності (1.1) для струму автоелектронної емісії цей факт можливо інтерпретувати як пробій при досягненні визначеної щільності струму автоелектронної емісії, тобто величини:

$$j = \text{const}. \quad (1.5)$$

Залежність (1.5) є критерієм пробою вакуумного проміжку постійним струмом. Цей критерій означає, що вакуумний пробій відбувається за рахунок електричного вибуху мікроступу на катоді при концентруванні в ньому великої щільності енергії за рахунок джоулевого розігріву струмом автоелектронної емісії.

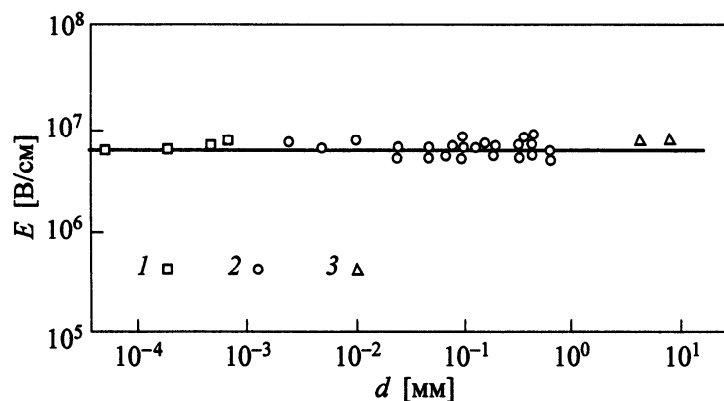


Рис. 1.20. Залежність локальної пробивної напруженості поля на катоді від міжелектродної відстані для вольфрамових електродів; точки 1,2,3 взяті з різних робіт

З цього критерію вакуумного пробою випливає, що пробивна напруга прямо пропорційно довжині проміжку: $U_{np} \sim d^\alpha$, де $\alpha < 1$. Цей ефект отримав назву «ефект повної напруги». На перший погляд здається, що цей ефект протирічить механізму пробою, що обумовлений мікробибухами. Однак це не так. Явище вибуху мікроділянок катода за рахунок концентрації в них енергії – універсальний процес. «Ефект повної напруги» означає, що для мікробибуху

недостатньо тільки струму автоелектронної емісії, а потрібні інші явища, що підсилюють процес концентрації енергії в мікрооб'ємах катода. Всі ці процеси призводять до утворення на катоді плазми, яка різко інтенсифікує процес мікровибуху на катоді.

1.2.6. Ініціювання вакуумного пробою плазмою

Вакуумний пробій може виникати при напруженості електричного поля, що є суттєво меншою від визначеною критерієм (1.5), якщо на катод попадає плазма від зовнішнього джерела. Мінімальна енергія, що необхідна для утворення на катоді плазми, яка здатна викликати пробій, становить $\sim 10^{-8}$ Дж. За наявності плазми на аноді енергія, необхідна для пробою та утворення плазми, збільшується на декілька порядків. Середня напруженість електричного поля, необхідна для пробою, в цьому випадку може бути на один-два порядки нижча, ніж у випадку відсутності плазми на катоді.

Існують два механізми збудження вакуумного пробою плазмою на катоді: один за рахунок посилення щільності струму на мікровиступах катода, другий – за рахунок зарядки діелектричних плівок та включень струмом іонів плазми та пробою цих плівок. У другому випадку щільність плазми, що здатна викликати пробій, на декілька порядків менша, ніж в першому випадку.

Ці два механізми мають фундаментальне значення для вакуумного розряду. Вони забезпечують процес самопідтримання розрядів на іскровій та дуговій стадіях. Зокрема, ці механізми відповідають за два типи катодних плям вакуумних дуг. Один тип, коли кратери згруповані або торкаються один одного, обумовлений взаємодією плазми з катодними мікровиступами або струменями рідкого металу, а другий, коли кратери розсіянні, – взаємодія плазми з діелектричними плівками або включеннями на катоді.

1.2.7. Електричний вибух металу

Якщо виконується критерій вакуумного пробою, то відбувається електричний вибух металу на вершині мікровиступу. Електричний вибух металу – це різка зміна фізичного стану металу в результаті інтенсивного виділення в ньому джоулевої енергії при пропусканні імпульсу струму великої щільності ($10^6 \div 10^9$ А/см²). При електричному вибуху металу відбувається порушення електропровідності металу. З точки зору фізики вакуумного розряду найбільший інтерес представляє нагрів металу із швидкістю зростання температури до 10^{12} К/с і вище. Це дозволяє забезпечити перехід металу через усі чотири стани речовини (твердий, рідкий, пар і плазма) за час $< 10^{-9}$ с.

Процес електричного вибуху металу складається з двох фаз.

Перша (або початкова) фаза включає нагрів металу в твердому стані, його плавлення і нагрів рідкого металу до початку пароутворення. Зміна щільності металу в цій стадії невелика, і вона описується класичними методами.

Друга фаза – це власне вибух металу. Вона супроводжується різким зростанням опору провідника, що обумовлено зменшенням щільності металу через його розширення.

Такий розподіл на дві стадії виправданий тим, що зміна щільності металу,

тобто його міжатомарних відстаней, сильно впливає на електронні спектри металу і механізм його електропровідності. Наприклад, питомий опір зростає більш ніж вдесятеро при зменшенні щільності міді в два рази. А при внесенні в мідь питомої енергії 10^4 Дж/г питомий опір зростає в 10^3 раз в порівнянні з нормальним станом. Найбільша щільність струму при цьому становить $5 \cdot 10^8$ А/см².

У початковій стадії електричного вибуху метал розширюється незначною мірою, тому його фізичний стан можна охарактеризувати одною термодинамічною величиною – температурою або питомою енергією. На цій стадії існує однозначна залежність між питомим опором і температурою. На більш пізніх стадіях вибуху такого однозначного зв'язку немає, що пояснюється залежністю питомого опору плазми від щільності струму.

Стадія власне вибуху – найбільш складна для вивчення. Теоретичні дослідження цього явища надзвичайно ускладнені. Точні аналітичні рішення задачі неможливі. Тому важливу роль відіграють експериментальні дослідження рівнянь стану металу і залежності питомого опору і теплопровідності від питомої енергії. Експериментальні результати для широкого діапазону стану речовини використовуються для побудови напівемпіричних моделей, які аналізуються комп'ютерними методами. Крім того, існують фізичні моделі, засновані на фундаментальних уявленнях про будову речовини. В цьому випадку для кожного стану металу використовується своя модель. Теоретично найкраще вивчені область газових станів і область надвисоких параметрів, коли речовина переходить в чисто плазмовий стан. При цьому відбувається перебудова атомних оболонок, яка супроводжується відривом зовнішніх електронів. Усі ці ефекти мають місце також при вибуху металу.

1.2.8. Вибухова електронна емісія

Електричний вибух на поверхні металу супроводжується емісією електронного струму, який на порядки перевищує струм автоелектронної емісії. Така емісія називається вибуховою електронною емісією.

Вибухова електронна емісія – термоелектронна емісія з ділянок катода, нагрітих до високих температур за рахунок мікробибухів (рис. 1.21). Ця емісія відбувається окремими порціями, які називаються ектони. Термін «ектон» (ecton) утворено від слів Explosive center або Electron cluster.

Якісно картина утворення ектона виглядає наступним чином. Спочатку при ініціюванні вибухової електронної емісії щільність струму становить близько 10^9 А/см². Відбувається швидкий розігрів мікрооб'єкта катода та його вибух, що призводить до виникнення ефекту вибухової емісії. По мірі розвитку вибуху відбувається збільшення зони емісії, тепловідвід, віднесення теплоти за рахунок викидання плазми та нагрітого рідкого металу. Все це знижує температуру зони та щільність струму термоелектронної емісії. Зменшення щільності емісійного струму призводить до ще скорішого охолодження зони емісії через зниження джоулевого розігріву. Тому струм вибухової емісії припиняється, утворюючи порцію електронів – ектон.

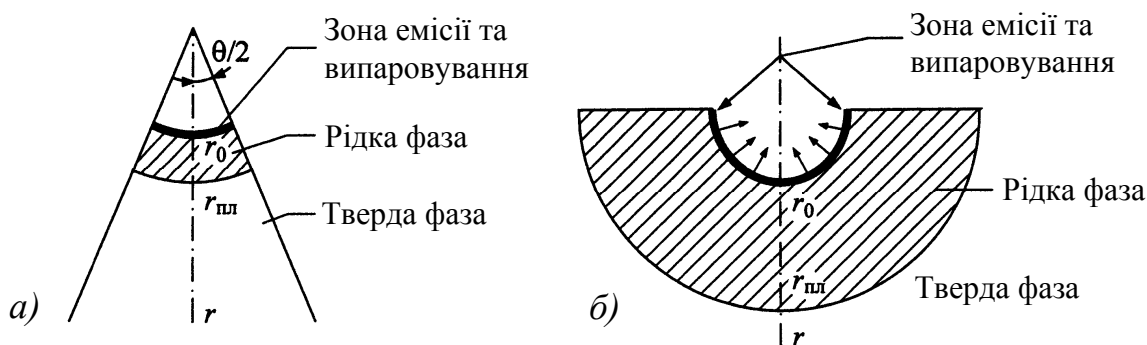


Рис. 1.21. Геометрія емісійного центра на вершині гострого катода (а) та на поверхні плоского катода (б)

Протягом функціонування ектона за рахунок джоулевого розігріву поверхні на катоді утворюється ванна рідкого металу з приблизним радіусом:

$$r = 2\sqrt{at_e}, \quad (1.6)$$

де t_e – час функціонування ектона, a – температуропровідність.

Зазвичай величина радіуса r ектона становить величину порядку 10^{-4} см (для Cu, Al, Mo та ін.). В результаті такого короткочасного ($t_e \approx 10^{-8}$ с) імпульсного тиску рідкий метал буде розбризкуватися, утворюючи краплі та струмені, швидкість яких становить 10^4 см/с. Це ілюструє фото кратера на катоді, що утворений струмом ~ 100 А при довжині імпульсу 20 нс (рис. 1.22). На знімку можна побачити струмені та краплі металу.

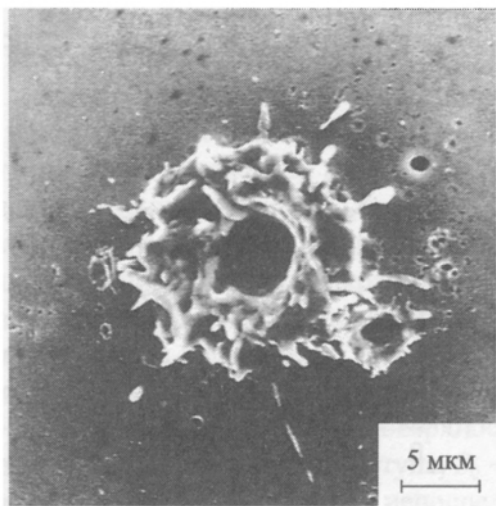


Рис. 1.22. Знімок поверхні плоского мідного катода після однократного ввімкнення струму при довжині імпульсу 20 нс

Таким чином, на катоді утворюються рідка та плазмова форми металу. Тому винос маси з катода (ерозія катода) відбувається як в рідкій, так і в плазмовій формах.

1.2.9. Струм вакуумної іскри

Струм вакуумної іскри носить чисто електронний характер, що підтверджується його відхиленням в магнітному полі та наявністю рентгенівського випромінювання з анода. Цей струм є струмом вибухової електронної емісії в результаті появи великої кількості вторинних ектонів. Емісія електронів з катода у вакуумному проміжку відбувається порціями (ектонами), але таких порцій багато.

Оскільки струм в іскрі протікає безперервно, важливим є питання механізму появи нових ектонів услід за первинними. Це відбувається за рахунок вибуху струменів рідкого металу або близьких мікровиступів при їх взаємодії з плазмою від попередніх ектонів. Наявність таких струменів підтверджує фото на рис. 1.22, на якому показано катодний кратер.

Ще один дуже ефективний спосіб ініціювання вторинних ектонів полягає у впливі катодної плазми на прилеглу катодну поверхню, яка має діелектричні плівки та включення. Іонний струм плазми заряджає діелектрик, який після цього пробивається. Плазма, що при цьому утворюється, допомагає утворенню нового ектона.

Пучок електронів, що утворюється на катоді за рахунок вибухової електронної емісії, пришвидшується та, попадаючи на анод, розігріває його. Цей розігрів призводить до утворення анодної плазми, рідкого металу та його парів, які з'являються, зазвичай, з деякою часовою затримкою відносно катодної плазми. Швидкість такої плазми може досягати 10^6 см/с.

Якщо на катоді утворюються електронні пучки, що розміщені близько один від одного, то на аноді спостерігається електростатична взаємодія таких пучків. Це призводить до зони підвищеної щільності струму та посиленню ерозії анода («ефект мазків»). Нагрів анода призводить до переносу його маси на катод. Для міді питомий переніс становить $\sim 10^{-2}$ г/Кл. Вплив електронного потоку на анод в іскровій стадії пробою призводить не тільки до ерозії анода та утворенню анодного факела, але і до появи потужного спалаху рентгенівського випромінювання.

1.2.10. Питання для самоперевірки

1. Навести визначення вакууму та приклади використання діелектричних властивостей вакууму.
2. Проаналізувати стадії розряду у вакуумі.
3. Розкрити особливості виникнення вакуумного пробою.
4. Яким чином поверхня електродів впливає на вакуумний пробій?
5. Що розуміють під автоелектронною емісією?
6. Здійснити аналіз типів емісійних центрів, що призводять до пробою вакуумного проміжку.
7. Які умови виникнення вибухової електронної емісії?

1.3. Електричний розряд у газах

Загальні відомості щодо розряду в газах. Аналіз залежності струму і напруги на газовому проміжку в процесі розряду. Процес виникнення розряду в газі. Електронна лавина. Типи розрядів у газах. Таунсендівський розряд, закон Пашена. Стримерний розряд. Корона та довгі іскри, ультракорона. Струм іскри та зниження напруги на проміжку. Вибухова емісія електронів. Моделі опору іскри.

1.3.1. Загальні відомості щодо розряду в газах

Існує два принципово різних типів розряду в газах: несамостійний і самостійний.

Несамостійним розрядом прийнято називати струм в газі, що протікає в умовах дії зовнішньої іонізації, усунення якої призводить до припинення струму.

Для запалення самостійного розряду до електродів треба прикласти деяку граничну напругу, що залежить від зовнішніх умов: тиску і сорту газу, конфігурації електродів, довжини проміжку, зовнішнього опромінення тощо. Таким граничним значенням вважається статична пробивна напруга U_c . Якщо досить повільно підвищувати різницю потенціалів на електродах, то при $U = U_c$ стрибком збільшується струм, з'являється видиме світіння в проміжку і спадає напруга на електродах, оскільки опір розрядного проміжку стає співмірним із зовнішнім опором електричного кола. Під досить повільним підвищенням напруги розуміють, що характерний час її зростання істотно перевищує час розвитку іонізаційних процесів в проміжку, або час встановлення передпробійного струму.

Інша ситуація має місце при імпульсному пробої. Тут до електродів прикладається імпульс напруги, причому в ідеальному випадку тривалість фронту імпульсу має бути набагато меншою, ніж час розвитку розряду. У такому випадку розряд може запалюватися при напрузі, що перевищує U_c . Перенапруга характеризується коефіцієнтом k_n , який є відношенням амплітуди імпульсу U_a до пробивної напруги U_c :

$$k_n = U_a / U_c . \quad (1.7)$$

При збільшенні k_n час запалення розряду зменшується, і відповідно для реалізації пробою сильно перенапружених проміжків треба подавати на електроди імпульси з фронтом близько наносекунди і менше.

1.3.2. Аналіз залежності струму і напруги на газовому проміжку в процесі розряду

При імпульсному пробої газів між моментом прикладання напруги до проміжку і початком пробою, який зазвичай фіксується за різким спадом напруги, проходить час запізнення t_z (рис. 1.23). Час запізнення найчастіше вимірюється від моменту, коли напруга досягає пробивної, до моменту спаду її до рівня $0,9U_a$, де U_a – амплітуда імпульсу. Початок іскри в газі ототожнюють

з різким спадом напруги. Процеси наростання провідності у стадії запізнення називають передпробійними явищами. Такий розподіл значною мірою умовний, оскільки рівень струму, що визначає спад напруги, залежить від опору зовнішнього електричного кола.

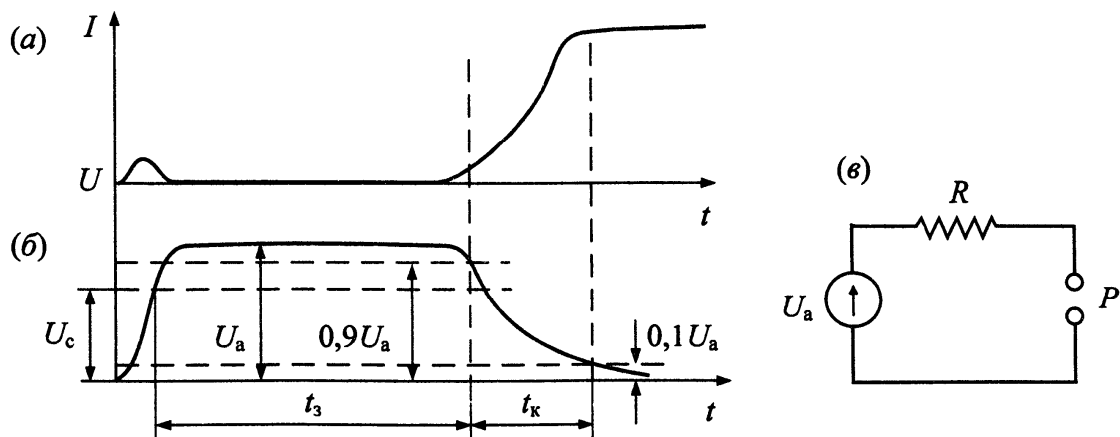


Рис. 1.23. Типова залежність струму (а) і напруги (б) на газовому проміжку в процесі розряду, схема розрядного контуру (в): U_a – напруга, прикладена до розрядника, R – опір в контурі, P – розрядник

Час, протягом якого відбувається спад, називається часом комутації t_k (рис. 1.23). Для початку іонізаційних явищ в проміжку необхідно мати хоч б один електрон, що ініціює. Тому прийнято розбивати час запізнення t_3 на дві складові:

$$t_3 = t_c + t_p, \quad (1.8)$$

де t_c – статистичний час запізнення, протягом якого в проміжку з'являється електрон, що ініціює; t_p – час формування розряду, протягом якого, за рахунок розвитку первинної електронної лавини і подальших стадій наростання іонізації, розвивається пробій.

Електрони ініціюються, як правило, з поверхні катода, а струм визначається її станом і зовнішніми умовами: напруженістю поля в проміжку, сортом газу, його тиском тощо. Відповідно і розподіл статистичного часу запізнення пробою характеризує емісійну здатність катода газорозрядного проміжку. Розвиток іонізаційних процесів в проміжку починається тоді, коли на катоді з'являється хоч б один електрон. Тобто імпульсна електрична міцність газу визначається тим, наскільки часто в одиницю часу на катоді виникають електрони, що ініціюють. Тому для однакових напруженостей поля імпульсні пробивні напруги в різних газах виявляються співвимірними, хоча напруги статичного пробою розрізняються у декілька разів.

Вимірювання статистичного часу запізнення є одним із способів контролю стану катодної поверхні в газі і широко використовується на практиці. Аналіз отриманих результатів часто дозволяє однозначно інтерпретувати механізм ініціації початкових електронів в конкретних умовах.

1.3.3. Процес виникнення розряду в газі, електронна лавина

За відсутності спеціальних допоміжних джерел електронів розряд ініціюється електронами, що створюються самим катодом. Можна вказати наступні джерела електронів, що ініціюють, з катода:

1. Автоелектронна емісія, викликана проходженням електронів через потенційний бар'єр, є основним джерелом електронів, що ініціюють, особливо при середній напруженості поля, близькій до 10^5 В/см і більше. При цьому до 100 і більше разів відбувається посилення електричного поля на мікроступах поверхні катода.

2. Емісія електронів, обумовлена діелектричними плівками і включеннями на поверхні катода ("ефект Мальтера" – аномальна емісія через діелектричні плівки на катоді і "ефект Петова" – автоемісія, посилена зарядом діелектричних включень на катоді). Роль цієї емісії особливо велика при використанні катодів, що легко окислюються.

3. Екзоелектронна емісія – це емісія електронів з поверхні металічних і неметалічних кристалів після механічних впливів на неї, а також ультрафіолетовими або рентгенівськими променями або тліючим розрядом (іноді називається "ефектом Крамера"). За відсутності спеціальної обробки електродів щільність струму екзоелектронів з катода не перевищує $100 \div 1000$ ел/(см²·с). Такий струм може вплинути тільки на процес пробою під дією мілісекундних імпульсів.

Таким чином, розряд в газі починається з появи хоч би одного електрона, що ініціює, якщо до проміжку прикладається досить велике електричне поле. Цей електрон рухатиметься в бік анода і здійснюватиме ударну іонізацію атомів і молекул газу. Якщо прийняти, що розряд виникає в однорідному електричному полі, то число електронів N_e через час t після появи первинних електронів становить:

$$N_e = N_{e0} \cdot e^{\alpha x} = N_{e0} \cdot e^{\alpha v_e t}, \quad (1.9)$$

де $x = v_e t$ – довжина шляху; α – коефіцієнт ударної іонізації; v_e – швидкість дрейфу електронів; N_{e0} – кількість початкових електронів.

Феномен, що має місце при кількості електронів $N_{e0}=1$, називається електронною лавиною.

Кожному знов утвореному електрону в лавині відповідає іон. Іони рухаються у бік катода із швидкістю v_i . Якщо число початкових електронів $N_{e0}=1$, то число іонів в лавині складе:

$$N_i = e^{\alpha x} - 1. \quad (1.10)$$

Іони бомбардують катод і викликають вторинну емісію електронів. Швидкість руху іонів значно менше швидкості електронів: $v_i \ll v_e$. Тому іони в лавині створюватимуть об'ємний заряд, електричне поле якого E' впливатиме на розвиток лавини. Оскільки поля E' і E (зовнішнє поле, обумовлене прикладеною напругою) спрямовані в протилежні сторони, то при $E' \sim E$ зростання числа електронів в лавині практично припиниться. Кількість

електронів, при якій це відбувається, називається критичним, позначається $N_{e\text{кр}}$. Довжину лавини і час її розвитку також називають критичними і позначають, відповідно, через $x_{\text{кр}}$ і $t_{\text{кр}}$.

1.3.4. Типи розрядів у газах

В залежності від співвідношення між довжиною проміжку d та критичною довжиною електронної лавини $x_{\text{кр}}$, при якій заряд одиночної лавини суттєво спотворює електричне поле, що прикладене до проміжку, розрізняють три типи розрядів у газах:

- *таунсендівський розряд*, при якому об'ємний заряд одиночної лавини не спотворює електричного поля в проміжку, оскільки $x_{\text{кр}} > d$;
- *стримерний розряд*, при якому в процесі розвитку розряду домінуючу роль відіграє первинна лавина, яка переходить у стример, а потім – в розрядний канал. Для існування стримерного розряду необхідно, щоб $x_{\text{кр}} < d$;
- *багатолавинний розряд*, який утворюється при $x_{\text{кр}} \ll d$. Це розряд з великою перенапругою, в ньому на довжині проміжку утворюється багато лавин критичного розміру.

1.3.5. Таунсендівський розряд, закон Пашена

В таунсендівському механізмі розряду основна роль відводиться вторинній емісії електронів з катода та послідовному процесу генерації електронних лавин. Якщо вторинні електрони виникають в результаті бомбардування катода позитивними іонами, то для однорідного поля струм I електронів, що надходять на анод, визначається співвідношенням:

$$I = \frac{I_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)}, \quad (1.11)$$

де d – довжина проміжку; I_0 – струм електронів з катода, що створюється зовнішнім джерелом; γ – кількість вторинних електронів з катода, що відповідають одному позитивному іону.

Значення коефіцієнта γ визначається матеріалом катода, станом його поверхні, сортом та тиском газу.

Згідно з теорією Таунсенда умова, за якої знаменник виразу (1.11) стає нульовим, є умовою виникнення розряду. Оскільки $\gamma \ll 1$, умова виникнення (запалення) розряду становить:

$$\gamma e^{\alpha d} \approx 1. \quad (1.12)$$

При $\gamma e^{\alpha d} < 1$, розряд буде несамостійним, при цьому, якщо початковий струм I_0 зменшити до нуля, то розрядний струм I припиниться.

При $\gamma e^{\alpha d} \approx 1$ розряд буде самостійним, оскільки кількість іонів $e^{\alpha d}$, що створюється однією лавиною в розрядному проміжку від одного електрона, є такою, що може утворитися один вторинний електрон, який продовжить розвиток розряду.

Випадок $\gamma e^{ad} > 1$ відповідає подальшому збільшенню напруженості електричного поля в газовому проміжку. При цьому іонізація через послідовну генерацію лавин носитиме кумулятивний характер. Швидкість розвитку розряду буде збільшуватися з ростом γe^{ad} .

Умова (1.12) дозволяє визначити статичну пробивну напругу розрядного проміжку:

$$U_c(pd) = \frac{Bpd}{\ln A pd + \ln \gamma}, \quad (1.13)$$

де d – довжина проміжку; p – тиск газу; A та B – сталі, значення яких визначають на основі експериментальних даних, зокрема в повітрі $A=15$ (см·мм.рт.ст.)⁻¹, $B=365$ В/(см·мм.рт.ст.).

Справедливість такого роду залежності $U_c(pd)$ була показана експериментально ще до появи теорії Таунсенда. Такі залежності називаються кривими або законом Пашена. Закон Пашена формулюється наступним чином: якщо в однорідному полі добуток довжини розрядного проміжку та тиску газу лишається незмінним, то величина пробивної напруги також є незмінною. На рис. 1.24 наведені криві Пашена для деяких газів.

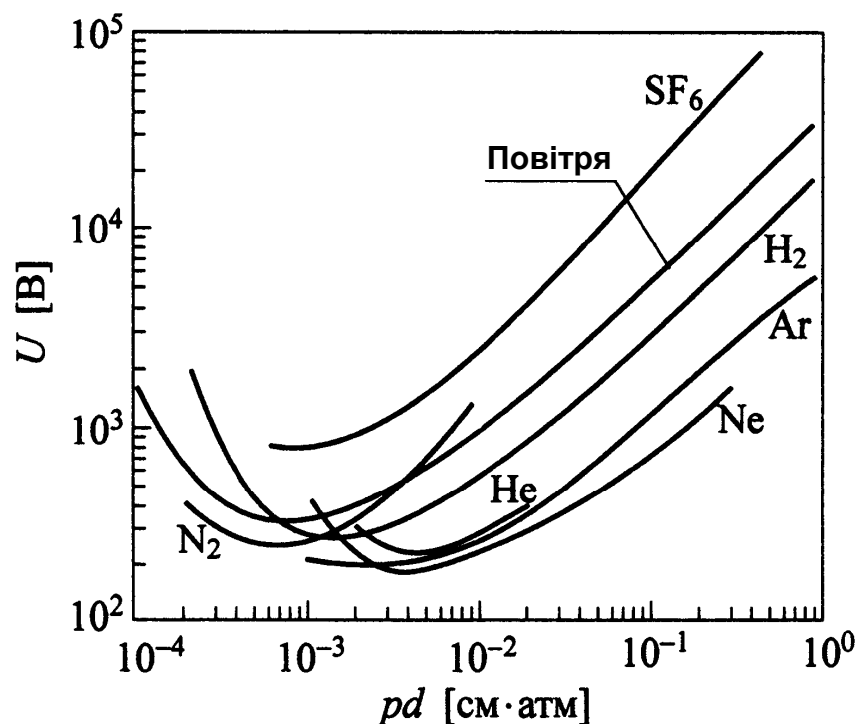


Рис. 1.24. Залежність напруги пробою від величини pd для різних газів (криві Пашена)

1.3.6. Стримерний розряд

Основна відмінність стримерного механізму розряду від таунсендівського полягає в тому, що просторовий заряд лавини може сам трансформувати лавину в плазмовий стример. Електрони в лавині викликають не лише ударну іонізацію, але і збудження газових молекул і атомів. Збуджені молекули або атоми, приходячи в нормальний стан, випускають кванти світла, які

викликають фотоіонізацію газу з появою фотоелектронів. Електронна лавина, досягнувши анода, залишає поблизу його поверхні позитивні іони, заряд яких створює додаткове поле з напруженістю E' . Фотоелектрони, що виникли поблизу анода, рухаються до позитивного об'ємного заряду в полі з напруженістю $(E' + E)$, де E – напруженість поля, обумовленого прикладеною напругою U . Якщо E' досягає величини порядку E , то фотоелектрони, досягнувши позитивного об'ємного заряду, встигають створити нову лавину, яка компенсує заряд іонів, що знаходяться у анода, що призводить до створення провідної плазми. Позитивні іони, що знову виникли під дією лавини фотоелектронів діють так само, як описано вище, і у напрямку до катода швидко поширюється стовп плазми, який називається позитивним стримером. Ретер і Мік сформулювали умову зародження стримера:

$$E' = kE, \quad (1.14)$$

де k – величина порядку одиниці.

Іншими словами, з електронної лавини, що виникає в електричному полі розрядного проміжку, за певних умов утворюються стримери – тонкі розгалужені канали, що тьмяно світяться та містять іонізовані атоми газу і відщепнуті від них вільні електрони. Стримери, подовжуючись, перекривають розрядний проміжок і сполучають електроди безперервними провідними нитками. Подальше перетворення стримерів на іскрові канали супроводжується різким зростанням струму і кількості енергії, що виділяється в них. Кожен канал швидко розширюється, в ньому стрибкоподібно підвищується тиск, внаслідок чого на його межах виникає ударна хвиля. Сукупність ударних хвиль від іскрових каналів, що розширюються, породжує звук, що сприймається як "тріск" іскри (у разі блискавки – це грім).

Стример – ниткоподібний провідний канал, уздовж якого напруженість поля є малою порівняно з напруженістю поля поза каналом на досить великій відстані від нього.

При переході від таунсендівського розряду до стримерного вирішальну роль відіграє коефіцієнт перенапруги k_n , який показує перевищення напруги, що прикладається до проміжку, над статичною пробивною напругою. Allen та Philips показали, що існує крива, що розділяє множину значень добутків тиску повітря і довжини зазору pd та коефіцієнта k_n на дві області (рис. 1.25). Якщо умови розряду відповідають області, що знаходиться вище кривої, має місце стримерний механізм розряду, а якщо нижче – таунсендівський.

1.3.7. Корона та довгі іскри, ультракорона

Корона виникає у тому випадку, коли на одному з електронів має місце різко неоднорідне поле. В цьому випадку електронна лавина з'являється при низькому середньому електричному полі. Якщо електричне поле в зоні цього електроду достатнє, щоб почалося утворення електронної лавини, то говорять про появу корони. Залежно від електроду з неоднорідним полем корона буває позитивної (анод) або негативної (катод). Корона проявляє себе по спочатку слабкому свіщенню в околиці електроду малого радіусу (вістря, дроту), де поле різко посилене. Тільки тут в невеликій зоні газ іонізується і світиться.

Електричний струм замикається потоком зарядів того або іншого знаку, які народжуються в зоні іонізації і витягуються через зовнішню зону до іншого електроду. У зовнішній зоні, де дрейфують заряди, ніякого світіння немає. У електронегативному газі, такому, як повітря, при будь-якій полярності коронуючого електроду струм через зовнішню зону переносять іони, тому що електрони встигають "прилипнути" до молекул O_2 на самому початку довгого дрейфу. Іонний струм малий і не знижує напруги на розрядному проміжку, навіть якщо джерело напруги слабке.

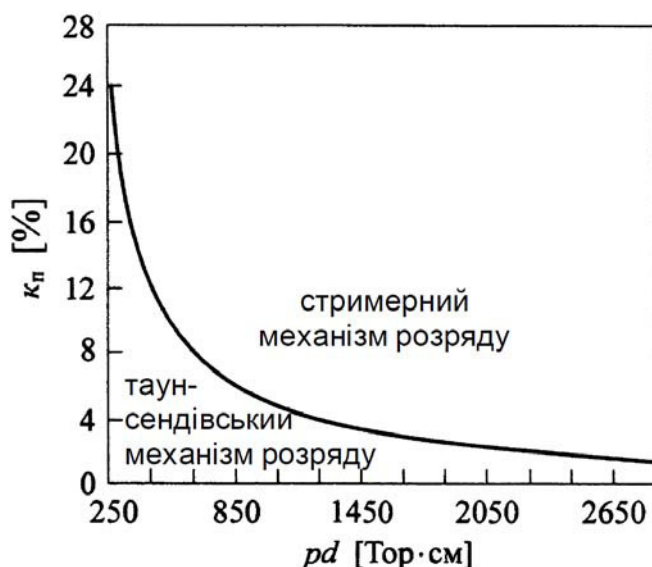


Рис. 1.25. Крива, що розділяє область розвитку розряду у повітрі за стримерним та таунсендівським механізмами

Якщо продовжувати повільно піднімати напругу набагато вище за поріг виникнення корони, процес може розвиватися двома шляхами. У разі дуже тонких полірованих дротів зовні майже нічого не міняється, зона іонізації залишається тонкою і однорідною, збільшується тільки струм корони – він наростає приблизно пропорційно квадрату напруги. Це так звана ультракорона. В повітрі атмосферного тиску ультракорону на дроті радіусом в доли міліметра вдавалося утримувати при дуже великих перенапруженнях, коли напруга на проміжку в 10-20 разів перевищувала напругу виникнення корони. Середня напруженість поля в проміжку збільшувалася до 20-22 кВ/см (це дуже велика величина для середніх полів в повітрі), перш ніж несподівано виникав іскровий канал, засліплюючи експериментаторів, що завершувало дослід коротким замиканням.

Зовсім по-іншому поводить себе корона у разі електродів великого розміру. При збільшенні напруги суцільна оболонка, що світиться, розпадається на окремі вогнища, в яких безперервно виникають і за мікросекунди гаснуть усе більш довгі утворення, що світяться, химерні тонкі канали – стримери. Таку дискретну у просторі та часі корону називають стримерною короною. У великих повітряних проміжках при напрузі вище 1 МВ стримерна корона може досягати декількох метрів. Імпульсний струм кожного зростаючого стримера

триває долі мікросекунди і вимірюється амперами, навіть десятками ампер, але доки стримери не досягають протилежного електроду, струм в зовнішній зоні, де немає іонізації, все одно переноситься потоком іонів і його середнє за часом значення майже того ж порядку, що і в ультракорони. Якщо дозволяє потужність джерела напруги, стримерну корону теж можна спостерігати годинами. До короткого замикання вона не призводить. Для цього треба, як мінімум, щоб стримерні канали перетнули увесь проміжок, що відбувається в атмосферному повітрі при середньому полі близько 5 кВ/см.

Корона може переростати в іскру, якщо один із стримерів торкається протилежного електроду. Довжини таких іскр досягають десятків і сотень метрів. Їх називають довгими іскрами. Проростання такої довгої іскри в повітрі відбувається за рахунок руху лідера, який утворюється із стримера при швидкості до 10^8 см/с. Лідер виникає на тлі коронного розряду, який тільки що був описаний, але при вищій напрузі. Лідерний розряд зручніше спостерігати при імпульсній напрузі. У лабораторіях частіше застосовують імпульси, в яких напруга збільшується до амплітудного значення за час порядку мікросекунди або менше. У разі таких імпульсів лідерові також передуює корона, але зазвичай відбувається всього один або декілька послідовних стримерних спалахів. Їх називають імпульсною короною. Стримери імпульсної корони стартують від загальної основи – стебла, яке проростає з високовольтного електроду. Як правило, стримери розгалужуються; їх часто називають гілками імпульсної корони. Залежно від напруги стримери перетинають велику або меншу частину проміжку, можуть дійти і до протилежного електроду, але самі по собі пробою проміжку не викликають. Їх провідність занадто мала. Навіть в сукупності струм стримерів не в змозі понизити напругу на проміжку.

Канал лідера народжується в об'ємі стебла імпульсної корони, де газ максимально нагрітий сумарним струмом, що стікається від усіх стримерних галузень. Рух лідера супроводжується безперервним і багатократним стартом стримерів з області кінця каналу, яку називають лідерною голівкою. Стримери можуть рухатися набагато швидше за лідера. Їх швидкість в повітрі при сильному електричному полі доходить до 10^9 см/с і вище. У сукупності стримери забезпечують струм, який поставляє енергію в канал лідера, розігріває його і сприяє тривалому підтриманню провідності плазми на не занадто низькому рівні.

Переносячи в якійсь мірі високий потенціал електроду, від якого він почав рости, лідерний канал неодмінно має і помітний електричний заряд, розподілений по його довжині. Це наслідок загальних законів електростатики, бо канал, як будь-який провідник, має електричну ємність. Після того, як плазмовий канал лідера доростає до протилежного електроду і перекриває проміжок, виникає процес нейтралізації заряду лідерного каналу, аналогічний головній стадії блискавки. Це головна стадія довгої іскри, за час якої лідерний канал трансформується в іскровий канал з по-справжньому доброю провідністю, що здатний пропустити великий струм, характерний для короткого замикання.

1.3.8. Струм іскри та зниження напруги на проміжку

У стадії формування розряду струм в газорозрядному проміжку є незначним. Після того, як плазма розряду досягне великої провідності, починається швидке зростання струму і спад напруги на іскровому проміжку. Цю стадію розряду називають іскровою. У цей період опір іскри змінюється від дуже великої величини, яка визначається властивостями лавини або стримера, до значення, багато меншого опору навантаження. Час такого переходу проміжку від практично непровідного стану в провідний визначає найменшу можливу тривалість фронту імпульсу на навантаженні. Процес переходу проміжку з непровідного стану в провідний можна характеризувати залежностями напруги U або опору R розрядного проміжку від часу. Криву $U_k(t)$ прийнято називати характеристикою комутації. Тривалість процесу комутації характеризується часом t_k між двома фіксованими точками на кривій комутації (рис. 1.26). Однією з них зазвичай вважають $U'_k = 0,9U_0$ (U_0 – початкова напруга на проміжку), а другу U''_k , залежно від характеру кривої, можна прийняти $U''_k = (0,1 \div 0,2)U_0$.

Основною характеристикою стадії спаду напруги (іскрової стадії) є залежність опору іскри від струму, сорту газу, його тиску, довжини проміжку, а також прикладеного початкового електричного поля.

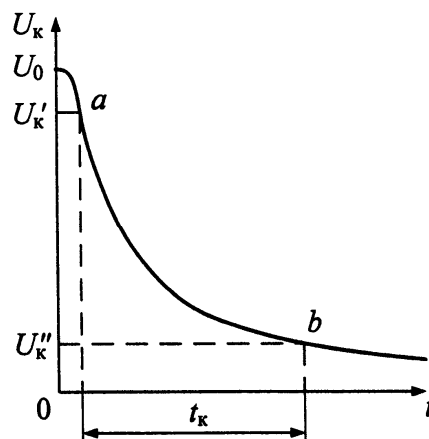


Рис. 1.26. Характеристика комутації іскрового розрядника

1.3.9. Вибухова емісія електронів, моделі опору іскри

Розглянемо випадок, коли розряд відбувається у вигляді вузького каналу. У разі стримерного розряду утворення каналу є природним процесом, оскільки зародження цього каналу починається вже з появою перших ознак стримера. Після того, як стример з'єднає катод і анод, починається утворення каналу розряду. Щільності плазми в стримері недостатньо для пропускання усього струму іскри, тому необхідні нові фізичні процеси, які б збільшили концентрацію плазми в стовпі розряду. Таким процесом є вибухова емісія електронів, яка виникає при взаємодії плазми стримера з катодом. Оскільки концентрація плазми в стримері невисока і може досягати 10^{13} см^{-3} , найбільш очікуваним механізмом появи вибухової емісії електронів є електричний пробій діелектричних плівок на катоді за рахунок їх заряду потоком іонів зі

стримерного каналу. Це призводить до появи катодної плями і сильного нагріву плазми каналу струмом електронів вибухової емісії.

Залежно від величини струму в каналі існує декілька моделей опору іскри. Однією з найбільш ранніх є емпірична модель Теплера:

$$R_u(I, t) = kd \left(\int_0^t I dt \right)^{-1}, \quad (1.15)$$

де k – константа Теплера, що характеризує газ; d – довжина проміжку.

З моделі Теплера (1.15) витікає, що опір іскри є обернено пропорційним кількості електрики, яка пройшла через канал розряду.

Більш обґрунтовану залежність опору іскри від струму і часу запропонували Ромпе і Вайцель, виходячи з умови балансу енергії для іскрового каналу:

$$R_u(I, t) = d \left(\frac{2a}{p} \int_0^t I^2 dt \right)^{-1}, \quad (1.16)$$

де a – константа, залежна від сорту газу; p – тиск газу; d – довжина проміжку.

При виведенні формули (1.16) передбачалося, що протягом часу функціонування іскри падіння потенціалу на електродах є несуттєвим порівняно із загальною напругою в області розряду, яка віддалена від електродів.

Іскровий канал, окрім резистивної компоненти опору, має ще і індуктивну, яка залежить в основному від довжини каналу. Індуктивність каналу додатково збільшує тривалість фронту імпульсу. Для зменшення впливу індуктивності здійснюють багатоканальну комутацію. Роль індуктивності зводиться до нуля при використанні об'ємного розряду.

Для розрахунку фронту імпульсу, що генерується в системі з іскровим розрядником, іноді характеристику комутації подають у вигляді експоненти:

$$U_k = U_0 e^{-\alpha_0 t}, \quad (1.17)$$

де значення величини α_0 встановлюється експериментально або з відомих моделей іскри. Зокрема, при використанні моделі Ромпе і Вайцеля:

$$\alpha_0 = 0,038ap(E/p)^2, \quad (1.18)$$

де E – напруженість поля, при якій відбувається пробій.

1.3.10. Питання для самоперевірки

1. Які типи розрядів у газах Вам відомі?
2. Які особливості імпульсного пробою газу?
3. Проаналізувати процес розряду в газовому проміжку.
4. Сформулювати закон Пашена.
5. Охарактеризувати процес виникнення розряду в газі.
6. Розкрити поняття «електронна лавина», «стример».
7. Критично проаналізувати умови виникнення корони, довгих іскр, ультракорони.
8. Що розуміють під вибуховою емісією електронів?

1.4. Електричний розряд у рідких діелектриках

Класифікація рідких діелектриків. Основні чинники, що впливають на пробій рідких діелектриків. Вплив вологи та мікродомішок на пробій. Вплив тиску. Вплив температури. Вплив тривалості дії напруги. Вплив геометрії електродів, відстані між ними, матеріалу та полярності на пробивну напругу. Бар'єрний ефект.

1.4.1. Класифікація рідких діелектриків, основні чинники, що впливають на пробій рідких діелектриків

Рідкі діелектрики, маючи значно вищу електричну міцність (в порівнянні з газами), знайшли дуже широке застосування як високовольтна ізоляція в різноманітних пристроях: трансформаторах, кабелях, конденсаторах, вимикачах, розрядниках тощо.

Рідкі діелектрики можна класифікувати по їх природі на наступні групи:

- 1) вуглеводні мінеральні – продукти перегону нафти і кам'яного вугілля (трансформаторна, конденсаторна олива);
- 2) вуглеводні рослинні (касторова, льняна олива);
- 3) хлоровані вуглеводні ароматичного ряду (хлордифеніл, совтол);
- 4) кремнійорганічні з'єднання.

У промисловості використовують технічно чисті рідкі діелектриками, у яких вплив сторонніх домішок обмежений деякою мінімальною концентрацією. В зв'язку з цим в теоріях пробою технічно чистих рідин розглядають вплив сторонніх домішок, що неминуче з'являються при експлуатації. Найважливіші сторонні домішки в рідких діелектриках:

- вода;
- гази;
- волокна целюлози;
- вуглець;
- продукти розкладання рідкого діелектрика, що використовується.

На пробій рідких діелектриків істотно впливає безліч чинників, які можуть як знижувати пробивну напругу (забруднення, зволоження та ін.), так і збільшувати його (очищення, тиск, бар'єри тощо). Основні чинники, що змінюють пробивну напругу U_{np} :

- 1) забруднення і зволоження (збільшення забрудненості оливи знижує U_{np} , мала кількість вологи ($< 0,03\%$) різко знижує U_{np});
- 2) в'язкість (зменшення в'язкості зменшує U_{np});
- 3) температура (зі збільшенням температури U_{np} зменшується; при імпульсній напрузі цей вплив незначний);
- 4) тиск (для технічно чистої оливи збільшення тиску призводить до збільшення U_{np} , оскільки збільшується тиск в газових бульбашках);
- 5) наявність бар'єрів (бар'єри можуть істотно підвищити U_{np} , особливо в суттєво неоднорідному полі);
- 6) час дії напруги (із збільшенням часу дії напруги U_{np} зменшується; чим чистіше діелектрик, тим менше цей вплив; на імпульсній напрузі коефіцієнт імпульсу в декілька разів більший, ніж для газових діелектриків);

7) форма, площа електродів і відстань між ними (зі збільшенням площі електродів U_{np} зменшується; збільшення відстані підвищує U_{np});

8) полярність електродів при несиметричній їх формі (при від'ємній полярності пробивна напруга більша, ніж при додатній; цей ефект тим більше, чим більш полярним є діелектрик).

Пробій рідких діелектриків – явище складне, що пояснюється складним складом рідких діелектриків і багатьма чинниками, що впливають на розвиток пробою (забруднення, форма, розміри і матеріал електродів, температура, тиск та ін.) Для добре очищених рідин величина електричної міцності досягає 1000 кВ/см.

1.4.2. Вплив вологи та мікродомішок на пробій

Волога в оливі може знаходитися в трьох станах: в молекулярно-розчиненому виді, у вигляді емульсії (дрібні кульки води розміром 2...10 мкм) і у вигляді водяного відстою на дні баку.

Наявність вологи позначається на електричній міцності оливи, особливо у присутності волокон, причому найсильніше впливає емульгована волога. Внаслідок великої діелектричної проникненості частинки вологи і волокна втягуються в область найбільшої напруженості електричного поля, поляризуються і витягуються уздовж силових ліній поля. Це призводить до утворення "містків" (які збільшують локальну щільність струму), до нагріву, сильного збільшення локальної напруженості поля в місцях розриву містків, внаслідок чого починаються місцеві іонізаційні процеси і може статися пробій усього міжелектродного проміжку.

Залежність пробивної напруженості трансформаторної оливи від вмісту вологи (рис. 1.27) показує, що наявність 40-50 мільйонних часток вологи зменшує електричну міцність оливи приблизно в 10 разів.

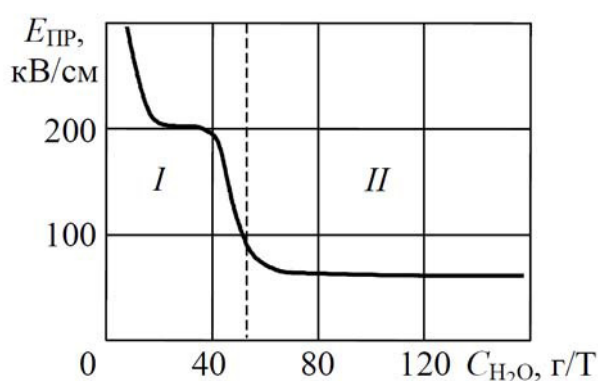


Рис. 1.27. Залежність електричної міцності трансформаторної оливи від вмісту вологи, C_{H_2O} (грам/тона): I – зона розчинення вологи;

II – емульгована волога

Зниження електричної міцності в області малих концентрацій викликане впливом розчиненої вологи, а в області великих концентрацій – емульгової вологи.

Наявність води і волокон слабо позначається на міцності рідких діелектриків при коротких імпульсах напруги (одиниці-десятки мікросекунд), оскільки частки домішок не встигають переміститися на значну відстань і вплинути на розвиток розряду в рідині.

Загальна кількість води, яка може знаходитися в оливі в молекулярно-розчиненому і емульгованому виді, обмежена. При вмісті води більше 0,02% волога випадає у вигляді відстою на дно. Хоча сам відстій і не впливає на електричну міцність, його поява свідчить про істотне погіршення ізоляційних властивостей оливи.

Особливо різке зменшення розрядної напруги відбувається за наявності в оливі гігроскопічних забруднень у вигляді волокон паперу, картону, пряжі, що значно полегшують утворення провідних містків. Ці забруднення проникають в оливу в процесі експлуатації з елементів твердої ізоляції, що знаходяться в оливі.

1.4.3. Вплив тиску

Пробивна напруга як технічних, так і очищених рідких діелектриків при промисловій частоті 50 Гц сильно залежить від тиску. Це пов'язано з наявністю і утворенням в рідині при високій напрузі бульбашок газу, що є місцями розвитку пробою. А електрична міцність газу, згідно із законом Пашена, сильно залежить від тиску.

На рис. 1.28 представлені залежності пробивної напруги трансформаторної оливи від тиску нижче атмосферного. При низькому тиску з оливи починають виділятися розчинені в ній гази і її міцність різко падає (рис. 1.28, крива 1).

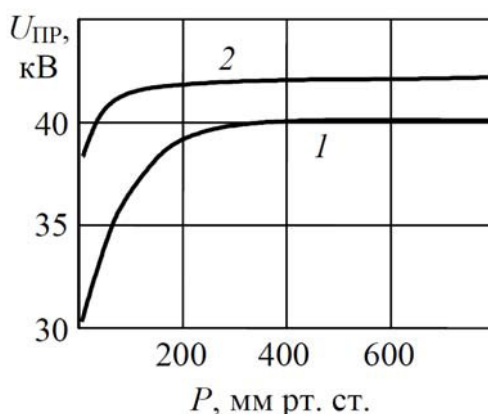


Рис. 1.28. Залежність пробивної напруги трансформаторної оливи від тиску:
1 – недегазована олива; 2 – дегазована олива

Залежність пробивної напруги від тиску суттєво збільшується з підвищенням міри очищення оливи (рис. 1.28, крива 2), що вказує на великий вплив газоподібних домішок. При тисках вище атмосферного (рис. 1.29) електрична міцність оливи збільшується, що також свідчить про наявність газу в оливі і його вплив на електричну міцність оливи.

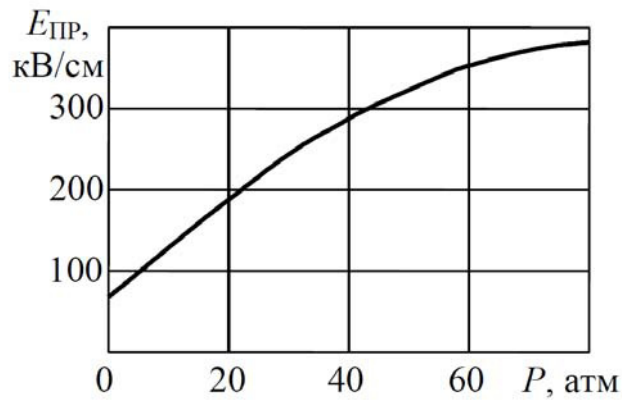


Рис. 1.29. Залежність пробивної напруги парафінової оливи від тиску (50 Гц)

1.4.4. Вплив температури

Електрична міцність рідких діелектриків в сильній мірі залежить від їх чистоти. Для чистих сухих рідин значного впливу температури не спостерігається в області робочих температур (рис. 1.30, крива 1).

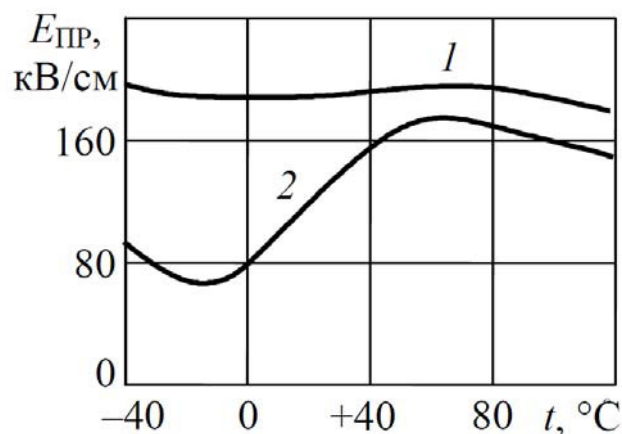


Рис. 1.30. Залежність електричної міцності трансформаторної оливи від температури: 1 – суха олива; 2 – технічна олива з домішкою води

Для технічно чистих рідин з домішкою води залежність електричної міцності від температури досить складна. З рис. 1.30 (крива 2) видно, що має місце мінімум і максимум електричної міцності. Зниження температури від точки максимуму призводить до зменшення $E_{пр}$ до мінімуму, що пов'язано з переходом розчиненої води до емульгованого стану. Подальше пониження температури (менше 0°C) викликає замерзання крапельок води і, як наслідок, підвищення $E_{пр}$.

Зменшення електричної міцності для сухого і технічного масел при температурі вище $+80^{\circ}\text{C}$ (рис. 1.30) обумовлено інтенсивним випаром і кипінням рідини.

1.4.5. Вплив тривалості дії напруги

Електрична міцність рідких діелектриків істотно залежить від тривалості τ дії прикладеної напруги. Чим більше домішок в рідині (особливо вологи і волокон), тим сильніша ця залежність (рис. 1.31).

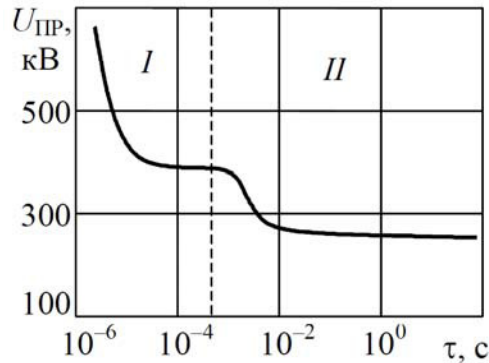


Рис. 1.31. Залежність пробивної напруги від часу дії для трансформаторної оливи (електроди вістря-площина, відстань між електродами 20 см)

Експериментальні результати по пробою рідких діелектриків показують наявність, як мінімум, двох областей, пов'язаних з часом дії напруги (рис. 1.31), поява яких пояснюється різними механізмами пробою. При дії імпульсів напруги з тривалістю $\tau < 10^{-4}$ с (рис. 1.31, область I) вплив домішок значно ослаблений, тобто вони не встигають переміститися на помітні відстані. Початкова стадія розряду в рідині виникає при напруженостях 100 кВ/см. В цьому випадку починають проявлятися процеси електронної емісії. Можливі процеси авто- і термоелектронної емісії з катода, а також процеси автоіонізації рідини у анода. Усі перераховані явища можуть брати участь в ініціації розряду.

Утворення газових бульбашок біля електроду може мати місце як за рахунок розкладання вуглеводнів рідкого діелектрика, так і за рахунок кипіння рідини під впливом виділеної енергії в локальних зонах електроду (теплова теорія пробою). У газових бульбашках розвивається ударна іонізація, утворюється стримерний канал, який розвивається до протилежного електроду.

Різка збільшення електричної міцності при $\tau < 10^{-5}$ с пов'язано із запізненням розвитку розряду, коли час дії напруги стає одного порядку з часом формування розряду. Збільшення часу дії напруги $\tau > 10^{-3}$ с призводить до швидкого зниження напруги пробою внаслідок впливу вологи і волокон, а також утворення газових бульбашок. При подальшому збільшенні часу дії напруги на зниження $U_{пр}$ суттєво впливають теплові процеси.

При тривалій дії напруги (рис. 1.31, область II) присутність вологи, газу, забруднень в рідкому діелектрику сильно знижує його електричну міцність, причому найбільш небезпечним є емульгований стан вологи. Пробій настає внаслідок утворення ланцюжків з дрібних поляризованих часток включень, які витягуються уздовж силових ліній. Ці ланцюжки утворюють канал, по якому протікає струм, що розігріває воду і прилеглу до каналу рідину до кипіння. Пробій рідини відбувається по газовому каналу, що утворився.

1.4.6. Вплив геометрії електродів, відстані між ними, матеріалу та полярності на пробивну напругу

Від форми електричного поля залежить електрична міцність та пробивна напруга діелектрика. Форми електричних полів поділяються на:

- *однорідні*, типовим прикладом однорідного поля є поле між двома плоскопаралельними електродами;
- *слабонеоднорідні*, що реалізується в системі електродів «куля – куля» при відстані S між електродами менше діаметра D кулі ($S < D$), рис. 1.32;
- *суттєво неоднорідні*, що реалізується в системі електродів «вістря – площа», або «вістря – вістря».

Ступінь неоднорідності електричного поля між електродами характеризується коефіцієнтом неоднорідності K_n , який дорівнює відношенню максимальної напруженості електричного поля E_{max} до середньої напруженості E_{cp} між електродами, тобто $K_n = E_{max}/E_{cp}$.

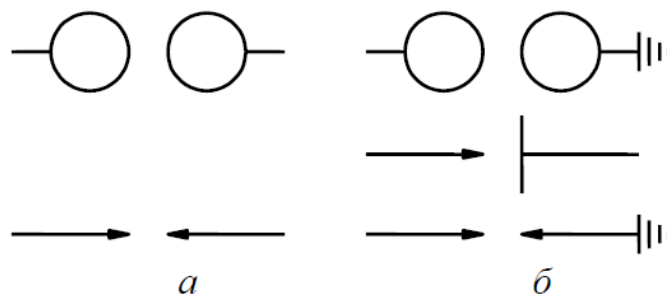


Рис. 1.32. Симетричні (а) та несиметричні (б) системи електродів

Тобто, геометрична форма електродів створює поля різної міри неоднорідності, і чим більше неоднорідності, тим нижче пробивна напруга. Навіть незначне збільшення радіусу кривизни електродів в суттєво неоднорідних полях дає істотніше збільшення U_{np} в порівнянні з повітрям. Збільшення відстані між електродами S призводить до збільшення пробивної напруги (рис. 1.33).

На величину пробивної напруги при незмінному S чинить вплив площа електродів і об'єм рідини між електродами: збільшення площі електродів і об'єму рідини викликає зниження U_{np} . Стан поверхні електродів також впливає на електричну міцність рідких діелектриків. Забруднення, окислення і погана поліровка поверхні електродів знижують електричну міцність. При збільшенні відстані між електродами вплив матеріалу електродів зменшується і при відстані декілька міліметрів практично припиняється. Вплив матеріалу електродів на електричну міцність рідких діелектриків здійснюється через емісію електронів з катода.

Як можна встановити з рис. 1.33, пробивна напруга залежить від полярності електроду-вістря при несиметричній системі електродів. Найяскравіше ця залежність проявляється для полярних рідин. Наприклад, для води U_{np} при негативній полярності вістря збільшується в 2,0-2,5 рази в порівнянні з позитивною полярністю.

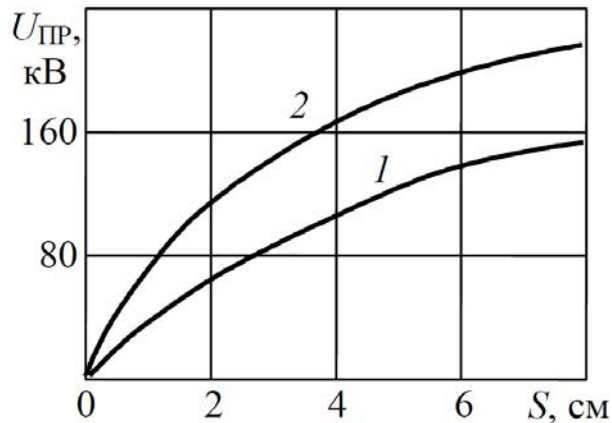


Рис. 1.33. Залежність пробивної напруги від відстані між електродами і полярності для трансформаторної оливи (електроди вістря-площина; напруга постійна):
1 – позитивна полярність вістря, 2 – негативна полярність вістря

1.4.7. Бар'єрний ефект

Бар'єри з твердого ізоляційного матеріалу, що встановлюються в оливі між електродами, дуже широко застосовуються для підвищення електричної міцності оливної ізоляції.

За наявності бар'єрів електрична міцність розрядного проміжку значно зростає. Це обумовлюється двома чинниками. Бар'єр непроникний для іонів рідини. Тому іони, рухаючись від одного електрода до іншого, осідають на бар'єрі, "розтікаються" по його поверхні і заряджають її. Завдяки цьому електричне поле в проміжку стає більш рівномірним, що призводить до збільшення розрядної напруги. Окрім цього, бар'єр ускладнює утворення суцільних провідних містків з волокнистих речовин, що знаходяться в оливі. Дія бар'єрів ефективніше в нерівномірних полях. При короткочасних імпульсних діях напруги бар'єри менш ефективні, чим при постійній і змінній напрузі.

На рис. 1.34 представлена відносна зміна пробивної напруги U_{δ}/U_{np} (U_{np} – пробивна напруга безбар'єрного оливного проміжку, а U_{δ} – пробивна напруга того ж проміжку з бар'єром) залежно від положення бар'єру S_{δ}/S (S – стала відстань між електродами, S_{δ} – відстань від вістря до бар'єру) в оливному проміжку, утвореному електродами «вістря-площина» при дії змінної напруги з частотою 50 Гц.

Бар'єр – плоский електрокартон завтовшки 5 мм. Відстань до бар'єру вимірюється від вістря. У цій системі координат пробивна напруга оливного проміжку без бар'єру дорівнює 1. Наявність бар'єру призводить до збільшення пробивної напруги. Максимальний ефект відповідає відстані до бар'єру $S_{\delta} \approx 0,25S$, що добре корелює з аналогічним ефектом для газу.

Олиобар'єрна ізоляція широко застосовується у високовольтній техніці при виготовленні трансформаторів, введень, реакторів тощо.

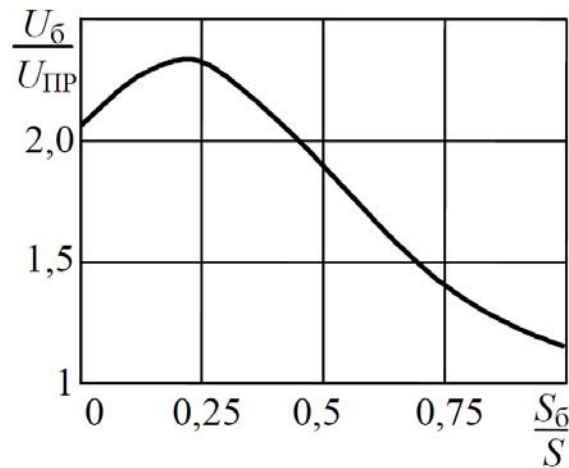


Рис. 1.34. Вплив бар'єра на пробивну напругу оливного проміжку: електроди вістря-площина, напруга частотою 50 Гц, $S=75$ мм

1.4.8. Питання для самоперевірки

1. Яким чином класифікують рідкі діелектрики?
2. Назвати основні чинники, що впливають на пробій рідких діелектриків.
3. Яким чином волога та мікродомішки впливають на пробій рідких діелектриків?
4. Як впливає тиск на пробій рідких діелектриків?
5. Розкрити вплив температури на пробій рідких діелектриків.
6. Як тривалості дії напруги впливає на пробій рідких діелектриків?
7. Яким чином геометрія електродів, відстань між ними, матеріал та полярність впливають на пробивну напругу рідких діелектриків?
8. Як бар'єри впливають на пробивну напругу рідких діелектриків?

1.5. Електричний розряд у твердих діелектриках

Види пробою твердого діелектрика. Фізичні явища в діелектрику при впливі електричного поля. Часткові розряди. Накопичення об'ємного заряду. Електролюмінесценція. Старіння твердих діелектриків.

1.5.1. Види пробою твердого діелектрика

Електрична міцність твердої ізоляції вища, ніж газоподібної і рідкої.

Електрична міцність твердої ізоляції залежить від:

- 1) форми електричного поля;
- 2) виду напруги і полярності;
- 3) часу дії напруги;
- 4) однорідності діелектрика;
- 5) електрофізичних характеристик;
- 6) температури.

Розрізняють три види пробою твердого діелектрика:

- 1) електричний – при напруженості 10^2 - 10^3 кВ/мм;
- 2) тепловий – при напруженості 10 - 10^2 кВ/мм;

3) старіння – при напруженості 10 кВ/мм і менше.

Тверда ізоляція включає усі види твердих діелектриків – від плівок до товстої монолітної ізоляції.

Найбільш сильний вплив на електричну міцність твердої ізоляції чинять час прикладення напруги, температура, товщина. Залежність пробивної напруги від часу прикладення напруги називається вольт-часовою характеристикою (рис. 1.35).

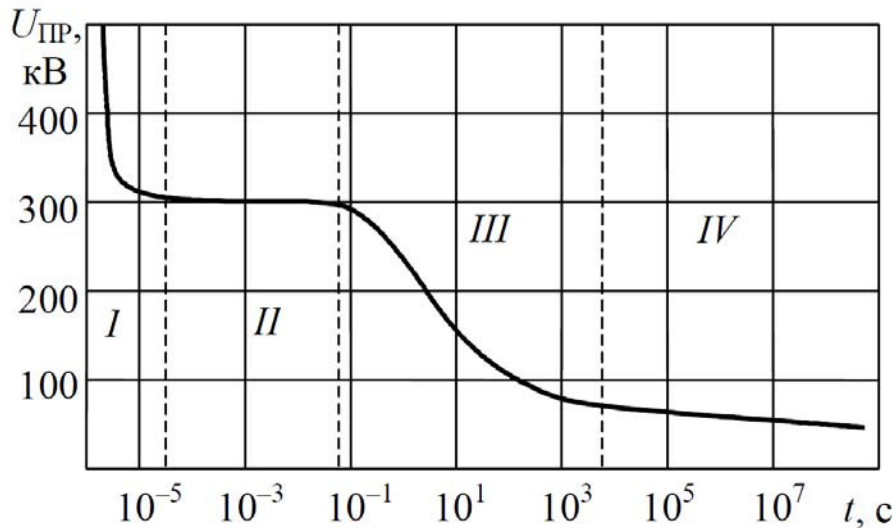


Рис. 1.35. Вольт-часова характеристика твердої ізоляції: *I* – електричний пробій, запізнення розвитку каналу розряду; *II* – електричний пробій, $t < 0,1$ с, не залежить від температури; *III* – тепловий пробій, $t > 0,1$ с, різке зниження напруги пробою в часі; *IV* – старіння, $U_{пр}$ мало змінюється, а час до пробою зростає суттєво

На кривій виділяють чотири області. Області *I* і *II* відповідають електричному пробою. Час прикладення напруги $t < 0,1$ с. Різке зростання пробивної напруги в області *I* обумовлене запізненням розвитку розряду відносно часу прикладення напруги. Область *III* характеризується різким спадом пробивної напруги, що свідчить про переважну роль теплових процесів. Область *IV* – повільне зниження пробивної напруги зі збільшенням часу дії, що пов'язано з повільними процесами старіння, деградації твердої ізоляції.

Електрична міцність $E_{пр}$ твердої ізоляції зростає зі зменшенням її товщини і особливо швидко – в області мікронних товщини. Цей ефект використовують в ізоляції конденсаторів, кабелів, введень та ін.

Вплив температури наочно ілюструє рис. 1.36, де приведена залежність електричної міцності фарфору від температури. Видно, що до температури $\sim +75^{\circ}\text{C}$ пробивна напруженість фарфору $E_{пр}$ практично не змінюється (область А). Подальше збільшення температури призводить до різкого зменшення $E_{пр}$ (область Б).

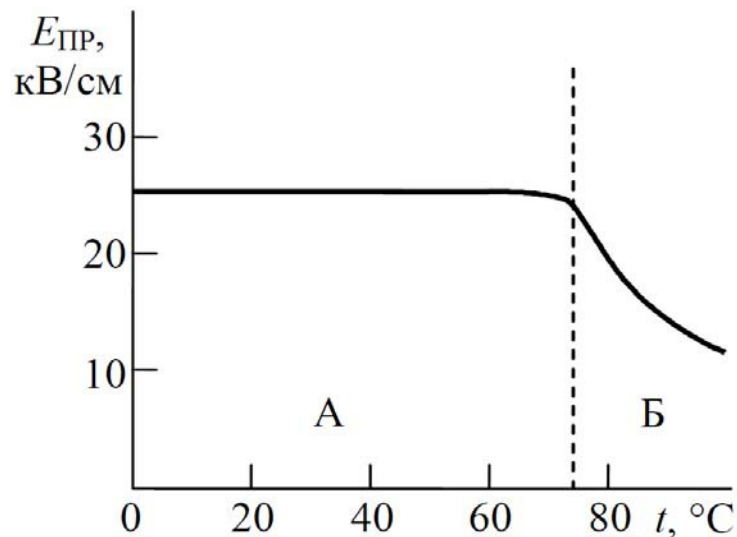


Рис. 1.36. Залежність пробивної напруги від температури для фарфору (напруга 50 Гц)

1.5.2. Фізичні явища в діелектрику при впливі електричного поля

При впливі на твердий діелектрик електричного поля, напруженість якого більша за деяку критичну величину $E_{кр}$, в діелектрику відбуваються нові фізичні явища, не властиві йому до цього, зокрема:

- часткові розряди,
- накопичення об'ємного заряду,
- електролюмінесценція.

1.5.2.1. Часткові розряди

Часткові розряди – це пробої дефектів ізоляції, тобто повітряних краплень, прошарків оливи, електрична міцність яких нижче твердої фази. Частковий розряд призводить до пробою тільки ослабленої частки, а не всього ізоляційного проміжку.

Часткові розряди зазвичай не призводять до наскрізного пробою діелектрика, проте призводять до місцевого руйнування ізоляції, а при тривалому існуванні можуть привести і до наскрізного пробою.

Виникнення часткових розрядів завжди свідчить про місцеву неоднорідність діелектрика. У зв'язку з цим реєстрація характеристик часткових розрядів дозволяє оцінювати якість виготовлення ізоляції і виявляти місцеві дефекти. Характеристики часткових розрядів досить добре корелюють з розмірами і кількістю дефектів, тобто дозволяють судити про міру дефектності ізоляційної конструкції.

Частковий розряд виникає при напруженостях електричного поля (так званих напруженостях початку часткового розряду E_{ipd}), які значно менші пробивної напруженості всього проміжку. Поодинокі часткові розряди практично не шкідливі для ізоляції, вони виникають при постійній напрузі. Але при змінній напрузі, наприклад частоті 50 Гц, навіть один частковий розряд за півперіод призводить до виникнення 100 розрядів за секунду. Тривала дія таких

розрядів може спричинити незворотні пошкодження ізоляції. Діелектрики неорганічного походження (на основі слюди, кераміки) більш стійкі до часткових розрядів. Органічні діелектрики (поліетилен, поліпропілен, фторопласт, полімерні матеріали тощо) швидко старіють під дією часткових розрядів. Тому останні вважаються основною причиною старіння ізоляції під дією високої напруги.

Частковий розряд – типове порогове явище. Напруга початку часткового розряду визначає ту межу, вище якої йде інтенсивне електричне старіння діелектрика, тому робочі напруженості електричного поля (E_p) вибирають нижче напруженості E_{ipd} початку часткового розряду:

$$E_p < E_{ipd} . \quad (1.19)$$

Виняток становить ізоляція імпульсних установок, де з метою зменшення її об'єму і вартості вимушені відмовлятися від цього обмеження ціною відповідного зменшення ресурсу. Об'єм ізоляції конденсаторів обернено пропорційний квадрату робочої напруженості, адже при заданій ємності збільшення товщини ізоляції має компенсуватися також відповідним збільшенням площі обкладинок. Зате ресурс ізоляції є обернено пропорційним робочій напруженості в степені $5 \div 12$. При збільшенні E_p всього на 10%, тобто в 1,1 разів, ресурс зменшиться в $1,1^{5 \div 12} = 1,6 \div 3,1$ разів.

Зменшення об'єму ізоляції досягається ціною суттєвого ослаблення її ресурсних можливостей.

При розгляді механізму виникнення часткового розряду скористаємося еквівалентною схемою заміщення діелектрика із загальною ємністю C_e (рис. 1.37):

$$C_e = C_0 + \frac{C_\epsilon C_\delta}{C_\epsilon + C_\delta} . \quad (1.20)$$

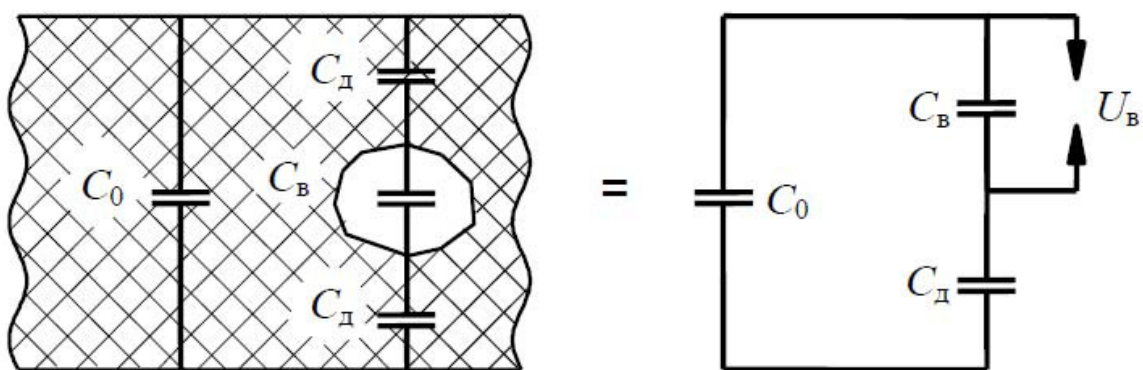


Рис. 1.37. Схема заміщення твердого діелектрика: C_0 – ємність бездефектної ізоляції; C_ϵ – ємність повітряного включення; C_δ – ємність діелектрика послідовно з включенням; U_ϵ – напруга пробією повітряного включення

Часткові розряди виникають тоді, коли напруга на включенні досягає пробивного значення U_{np} – напруги запалення розряду у включенні.

Напруженість електричного поля у включенні E_{ϵ} пов'язана з напруженістю в іншій частині діелектрика:

$$E_{\epsilon} = E_{\partial} \frac{\epsilon_{\partial}}{\epsilon_{\epsilon}}, \quad (1.21)$$

де E_{∂} – напруженість електричного поля в діелектрику; ϵ_{∂} – відносна діелектрична проникність діелектрика; ϵ_{ϵ} – відносна діелектрична проникність включення.

Виходячи з виразу (1.21), напруженість електричного поля в газовому включенні (і в будь-якому іншому, де $\epsilon_{\epsilon} < \epsilon_{\partial}$) завжди вища, ніж в діелектрику.

Епюри напруги на повітряному включенні в процесі прикладення змінної напруги наведені на рис. 1.38.

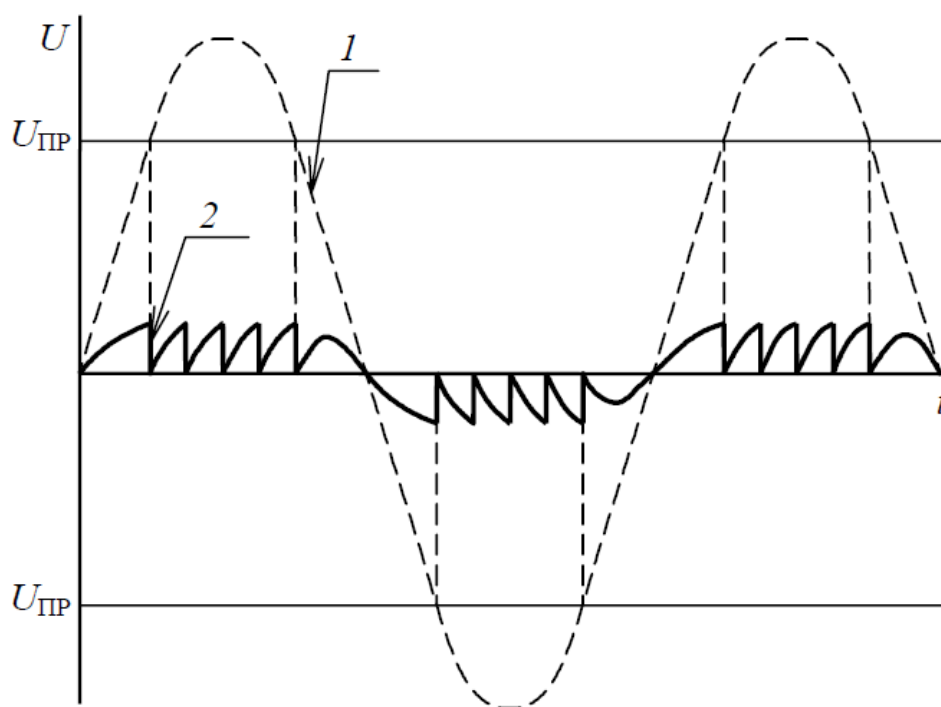


Рис. 1.38. Епюри напруги на повітряному включенні в твердому діелектрику:
1 – напруга на зразку; 2 – напруга на включенні; $U_{пр}$ – напруга на зразку, при якому відбувається пробій повітряного включення

При розмірах включення десятки мікрометрів і тиску, близькому до атмосферного, пробивна напруга лежить поблизу мінімуму кривої Пашена, слабо змінюється зі зміною розмірів включення і складає 250..300 В.

Руйнівна дія часткових розрядів на діелектрики обумовлена наступними факторами, що виникають при пробіі включення:

- 1 – дією ударних хвиль;
- 2 – тепловою дією;
- 3 – бомбардуванням зарядженими частками;
- 4 – дією хімічно активними продуктами розряду (озон, оксиди азоту);
- 5 – дією випромінювання;

6 – розвитком деревовидних макродефектів – дендритів.

Найбільшу небезпеку часткові розряди представляють при змінній або імпульсній напрузі.

На постійній напрузі інтервал між частковими розрядами у включенні становить секунди – десятки секунд, що на декілька порядків більше, ніж на змінній напрузі промислової частоти. Це дозволяє збільшити робочі напруженості електроізоляційних конструкцій постійної напруги в порівнянні із змінним.

Розвиток часткових розрядів на імпульсній напрузі принципово не відрізняється від змінної напруги. Часто основною причиною пробою ізоляції при багатократній дії імпульсної напруги є часткові розряди.

1.5.2.2. Накопичення об'ємного заряду

Тривалий час часткові розряди були основним об'єктом уваги дослідників, доки процеси старіння ізоляції не були помічені і в умовах повної відсутності часткових розрядів. Виявилося, що причиною цього є утворення об'ємного заряду, який призводить до збільшення локальної напруженості електричного поля в 5-8 разів, внаслідок чого в суцільному твердому діелектрику з'являються мікродефекти. Характерна їх довжина вздовж силових ліній електричного поля менша за 0,1 мкм, і часткові розряди в них не виникають. Але поступове накопичення мікродефектів призводить до виникнення макродефектів, довжина яких перевищує 1 мкм. У макродефектах вже спалахують часткові розряди, після чого процес старіння протікає значно інтенсивніше.

Утворення об'ємного заряду – теж порогове явище. В поліетиленовій ізоляції кабелів воно починається при напруженостях поля вищих за 14 МВ/м. При робочих напруженостях $E_p = 8 \div 10$ МВ/м, типових для високовольтних силових кабелів, утворення об'ємного заряду в них можливе тільки поблизу мікроскопічних дефектів поверхні жили та оболонки (задири, подряпини), де локальна напруженість поля перевищує зазначену межу. Останнім часом явище об'ємного заряду вивчається дуже інтенсивно, особливо після 1985 року, коли Такада (Японія) і Кук (США) висунули ефективний метод вимірювання об'ємного заряду, так званий метод акустичної емісії, стимульованої електричним полем.

1.5.2.3. Електролюмінесценція

Явище електролюмінесценції починається при напруженостях від 2 до 20 МВ/м (залежно від типу діелектрика). Воно полягає у виникненні спалахів світла під час інжекції заряду в діелектрик з поверхні електрода. На відміну від часткових розрядів спалахи світла електролюмінесценції мають надзвичайно низьку інтенсивність. До того ж енергія квантів світла електролюмінесценції дуже мала і відповідає інфрачервоному діапазону спектра. Інтенсивність спалахів електролюмінесценції зростає зі збільшенням напруженості поля.

1.5.3. Старіння твердих діелектриків

Основні види старіння діелектриків – електричне, теплове, механічне, радіаційне.

Електричне старіння відбувається, головним чином, під дією часткових розрядів. В суцільному твердому діелектрику (поліетилені) внаслідок інжекції об'ємного заряду і зростання локального поля спочатку утворюються мікродефекти, далі – макродефекти (дендрити). Часткові розряди в останніх різко прискорюють процес їх проростання. Це закінчується пробоем діелектрика. Закономірності електричного старіння діелектриків часто відповідають степеневій функції:

$$\tau = AE^{-m}, \quad (1.22)$$

де τ – ресурс діелектрика; E – напруженість електричного поля; A , m – емпіричні коефіцієнти.

Теплове старіння зумовлене процесами окислення і деструкції діелектриків. Воно описується відомим співвідношенням Арреніуса:

$$\tau = A \cdot \exp\left(\frac{W}{kT}\right), \quad (1.23)$$

де A – емпіричний коефіцієнт; W – енергія активації процесу термоокисного старіння; k – стала Больцмана; T – абсолютна температура. У невеликих межах зміни температури справедливе так зване правило Монтзінгера: при збільшенні температури на 8-10° С ресурс ізоляції зменшується у 2 рази.

Механічне старіння характерне для твердої ізоляції. У ній виникають термомеханічні напруження внаслідок неоднакових температурних коефіцієнтів лінійного теплового розширення її окремих компонентів, наприклад компаунда і слюди, діелектрика і металевих електродів. Їх тривала дія, особливо в умовах одночасного впливу сильних електричних полів, також приведе до виникнення мікродефектів. Подальша еволюція останніх часто є причиною пробою ізоляції. Деструкція ізоляції під впливом внутрішніх термомеханічних напружень або зовнішніх навантажень – *механічне старіння* – описується формулою Журкова:

$$\tau = A \cdot \exp\left(\frac{W - \gamma\sigma}{kT}\right), \quad (1.24)$$

де σ – механічна напруга в діелектрику, Па; γ – структурно-чутливий коефіцієнт; W – енергія активації процесу механічної деструкції; A – емпіричний коефіцієнт.

Процеси старіння ізоляції прискорюються також внаслідок її гігроскопічного зволоження. Це характерно для всіх видів негерметизованої твердої ізоляції, яка містить мікрокапіляри – пори завтовшки менше 0,1 мкм.

Електротехнічне обладнання в умовах опромінення γ -променями, нейтронами експлуатується на атомних електростанціях. Під впливом іонізуючого опромінення в діелектрику відбувається утворення хімічно

активних радикалів. При активній дії кисню в такому діелектрику має місце радіаційно-окисна деструкція.

Проблемами старіння діелектриків зараз займаються дуже інтенсивно. Це пов'язано з рядом причин. З одного боку, системи ізоляції, які були здані в експлуатацію 15-25 років тому, вже майже вичерпали свій ресурс. Їх своєчасна заміна – складне техніко-економічне завдання, що має спиратися на об'єктивний аналіз стану ізоляції та обґрунтування необхідності її заміни.

З іншого боку, останнім часом освоєні нові методи аналізу діелектриків, так звані апаратурні методи, пов'язані із застосуванням складних технічних приладів та установок: хроматографічний аналіз, термогравіметрія, диференціальна сканувальна калориметрія, масоспектроскопія, спектроскопія електронного парамагнітного та ядерного магнітного резонансу. Порівняно з класичними методами ресурсних випробувань, нові апаратурні методи дають можливість визначити ресурс діелектрика майже в шість разів швидше.

Унаслідок різноманітності та взаємного впливу різних механізмів старіння діелектрика визначення робочих напруженостей електричного поля, при яких забезпечується необхідний ресурс, являє собою надзвичайно складну проблему. Вона значно ускладнюється ще й тим, що ресурс τ – статистична характеристика, якій властивий дуже великий розкид, часто за межами одного порядку.

1.5.4. Питання для самоперевірки

1. Проаналізувати види пробою твердого діелектрика.
2. Які фізичні явища мають місце в твердому діелектрику при впливі електричного поля?
3. Описати фізичну картину виникнення часткових розрядів в твердих діелектриках.
4. Які причини та наслідки накопичення об'ємного заряду в твердих діелектриках?
5. Що розуміють під старінням твердих діелектриків?

РОЗДІЛ 2. ПЕРЕНАПРУГИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

2.1. Загальна характеристика перенапруг, грозові перенапруги

Загальна характеристика перенапруг та засобів захисту від них. Блискавка як джерело грозових перенапруг, етапи утворення блискавки.

2.1.1. Загальна характеристика перенапруг та засобів захисту від них

Перенапруга – це тимчасове підвищення напруги понад найбільшу допустиму робочу напругу електроустановки (рис. 2.1).

В більшості випадків перенапруги мають короткочасний характер, оскільки вони виникають при швидко затухаючих перехідних процесах або в аварійних режимах, час яких обмежується дією релейного захисту і системної автоматики. Різні види перенапруг мають тривалість від одиниць мікросекунд до декількох годин. Навіть короткочасні перенапруги високої кратності можуть призвести до пробоя або перекриття ізоляції з наступним відключенням пошкодженого елемента мережі і перервою в електропостачанні споживачів або зниженням якості електроенергії.



Рис. 2.1. Стилізований графік миттєвих значень напруги при виникненні грозових та комутаційних перенапруг

Найважливішою характеристикою перенапруг є їх кратність, тобто відношення максимального значення напруги до амплітуди $\sqrt{2}U_{нр}$ найбільшої робочої напруги для цього класу напруги:

$$k_n = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}U_{нр}}. \quad (2.1)$$

Перенапруги, крім того, характеризуються рядом інших параметрів (повторюваністю, довжиною фронту, тривалістю, числом імпульсів і часом існування цієї перенапруги, шириною охоплення мережі). Усі перераховані параметри перенапруг є, як правило, випадковими величинами, що визначає необхідність статистичного підходу до їх дослідження і обґрунтування вимог до електричної міцності ізоляції і характеристик захисних пристроїв.

Класифікація перенапруг є наступною.

1. За місцем виникнення:

- 1.1. **Фазні перенапруги** впливають на ізоляцію струмопровідних частин електроустаткування від землі або заземлених конструкцій, мають найбільше практичне значення.
- 1.2. **Міжфазні перенапруги** розглядаються при виборі міжфазної ізоляції.
- 1.3. **Внутрішньофазні перенапруги** виникають між різними струмопровідними елементами однієї і тієї ж фази, наприклад, між сусідніми витками або котушками обмотки трансформатора, а також між нейтраллю і землею.
- 1.4. **Перенапруги між контактами комутаційних апаратів** виникають в процесі відключення ділянки мережі або при несинхронній роботі двох ділянок мережі.

2. За причиною виникнення:

2.1. ЗОВНІШНІ ПЕРЕНАПРУГИ – грозові розряди:

- 2.1.1. **Прямий удар блискавки** викликає найбільш небезпечні перенапруги.
- 2.1.2. **Індуктовані перенапруги** виникають внаслідок взаємного електромагнітного (індуктивного і ємнісного) зв'язку блискавки з струмопровідними і заземленими елементами мережі. Вони в більшості випадків мають меншу величину і можуть представляти небезпеку для мереж 3...35 кВ при ударі блискавки поблизу лінії.
- 2.1.3. **Набігаючі хвилі:** хвилі перенапруг поширюються по лінії електропередачі на значні відстані з малим згасанням, тому імпульси грозових перенапруг можуть впливати на ізоляцію електроустановок, розташованих на значному видаленні від місця удару блискавки.

2.2. ВНУТРІШНІ ПЕРЕНАПРУГИ:

- 2.2.1. **Комутаційні перенапруги** виникають при будь-яких швидких змінах режимів роботи мережі.
 - 2.2.1.1. Перенапруги при **ввімкненні розімкненої лінії**
 - 2.2.1.2. Перенапруги при **автоматичному повторному ввімкненні**
 - 2.2.1.3. Перенапруги при **відключенні конденсаторів та ненавантажених ліній**
 - 2.2.1.4. Перенапруги при **відключенні великих струмів**
 - 2.2.1.5. Перенапруги при **відключенні малих індуктивних струмів**
 - 2.2.1.6. Перенапруги при **переміжних замиканнях на землю**
- 2.2.2. **Квазістаціонарні перенапруги** – виникають при тимчасових, з точки зору експлуатації, режимах роботи і несприятливих поєднаннях параметрів мережі і можуть тривати до тих пір, поки не

зміниться схема або режим мережі. Тривалість таких перенапруг – від секунд до десятків хвилин – обмежується дією релейного захисту або оперативного персоналу.

2.2.2.1. Режимні перенапруги спостерігаються при несприятливих поєднаннях електрорушійних сил, що діють в мережі. До них можна віднести перенапруги при несиметричному короткому замиканні на землю, а також при перезбудженні і розгоні генератора, які виникають у разі раптового скидання навантаження.

2.2.2.2. Резонансні перенапруги мають місце при наближенні однієї з власних частот коливань окремих ділянок мережі до частоти вимушеної електрорушійної сили (ЕРС). Вони можуть виникнути, наприклад, при односторонньому живленні лінії електропередачі. Можуть виникнути також в нейтралі і фазах мережі з дугогасним реактором внаслідок резонансу в контурі, що складається з його індуктивності і ємності мережі на землю. У неповнофазних режимах лінії з приєднанням до неї реактором або трансформатором із заземленою нейтраллю може утворитися резонансний контур з ємності між фазами лінії і індуктивності реактора або трансформатора.

2.2.2.3. Ферорезонансні перенапруги можуть розвиватися в контурах, що містять ємність і індуктивність з насиченим магнітопроводом. Такі перенапруги спостерігаються як на промисловій частоті, так і на вищих і нижчих гармоніках.

2.1.2. Блискавка як джерело грозових перенапруг, етапи утворення блискавки

Блискавка є електричним розрядом між хмарою і землею або між хмарами. Блискавці передуює процес розподілу і накопичення електричних зарядів в грозових хмарах, що відбувається в результаті виникнення в хмарах потужних висхідних повітряних потоків і інтенсивної конденсації в них водяної пари.

Краплі води, що досягли ділянки негативних температур, замерзають. Замерзання починається з поверхні краплі, яка покривається кірочкою льоду. Тепло, що виділяється при цьому, підтримує температуру усередині краплі близько 0° С. Наявні у воді позитивні іони під дією різниці температур переміщуються до поверхневого шару краплі і заряджають його позитивно, тоді як рідка серцевина краплі набуває надлишковий негативний заряд. Коли замерзає серцевина краплі, то внаслідок її розширення раніше замерзлий поверхневий шар лопається і його позитивно заряджені уламки відносяться потоком повітря у верхні частини хмари. Таким чином, нижня частина грозової хмари виявляється зарядженою негативно, а вершина – позитивно. Це один з основних процесів електризації грозових хмар, і тому в більшості випадків (до 90%) блискавки бувають негативними, тобто переносять на землю негативний заряд (рис. 2.2).

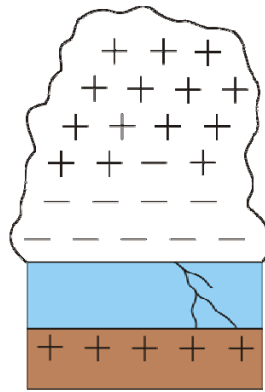


Рис. 2.2. Розподілення зарядів у грозовій хмарі

У середніх широтах землю вражають 30-40% загального числа блискавок, інші 60-70 % складають розряди між хмарами або між різнойменно зарядженими частинами хмар.

Лінійна низхідна блискавка – це декілька іскрових розрядів (імпульсів, компонентів блискавки) між хмарою і землею, що сліднують один за одним. Принципово важливу роль грає перший імпульс (компонент), оскільки він проходить у незбуреному повітрі, яке не було заздалегідь іонізовано і нагріто.

У розвитку імпульсу є дві стадії – лідерна і головна. На лідерній стадії в напрямі від хмари до землі формується плазмовий канал розряду. На головній стадії по каналу, що утворився, швидко проходить у зворотному напрямі (від землі до хмари) імпульс основного струму. Його називають зворотним ударом (рис. 2.3).

Лідерна стадія починається з утворення біля основи хмари плазмових "ниток" – так званих стримерів. Вільні електрони, що знаходяться в основі хмари, набувають під дією електричного поля напруженістю близько $3 \cdot 10^5$ В/м величезного прискорення. Це прискорення спрямоване вниз, оскільки нижня частина хмари заряджена негативно, а поверхня землі під хмарою – позитивно. Стикаючись з молекулами повітря, електрони іонізують їх. При цьому народжуються нові (вторинні) електрони, які, у свою чергу, прискорюються в полі хмари і потім в зіткненнях іонізують нові молекули. Виникає лавина швидких електронів, що утворюють нитки плазми (стримери).



Рис. 2.3. Блискавки

Об'єднуючись, стримери дають початок плазмовому каналу (рис. 2.4, а). Цей канал наповнений вільними електронами і іонами і тому може добре проводити електричний струм. Його називають лідером або, точніше, ступінчастим лідером.

Канал формується стрибками ("східцями"). Голівка лідера вискакує з хмари і рухається із швидкістю близько 10^7 м/с. Пройшовши відстань близько 100 м, вона несподівано зупиняється. Зупинка триває близько $5 \cdot 10^{-5}$ с. Лідер як би "набирається сил", а потім відбувається стрибок ще приблизно на 100 м, причому зовсім не обов'язково у напрямі попереднього стрибка, – і знову коротка зупинка. Так окремими стрибками (східцями) голівка лідера поступово наближається до земної поверхні, залишаючи позаду себе плазмовий канал у вигляді ламаної лінії (рис. 2.4, б). Світиться лідер відносно слабо, його майже не видно; при високошвидкісному фотографуванні його голівка виглядає світлою плямочкою, що ривками наближається до землі.

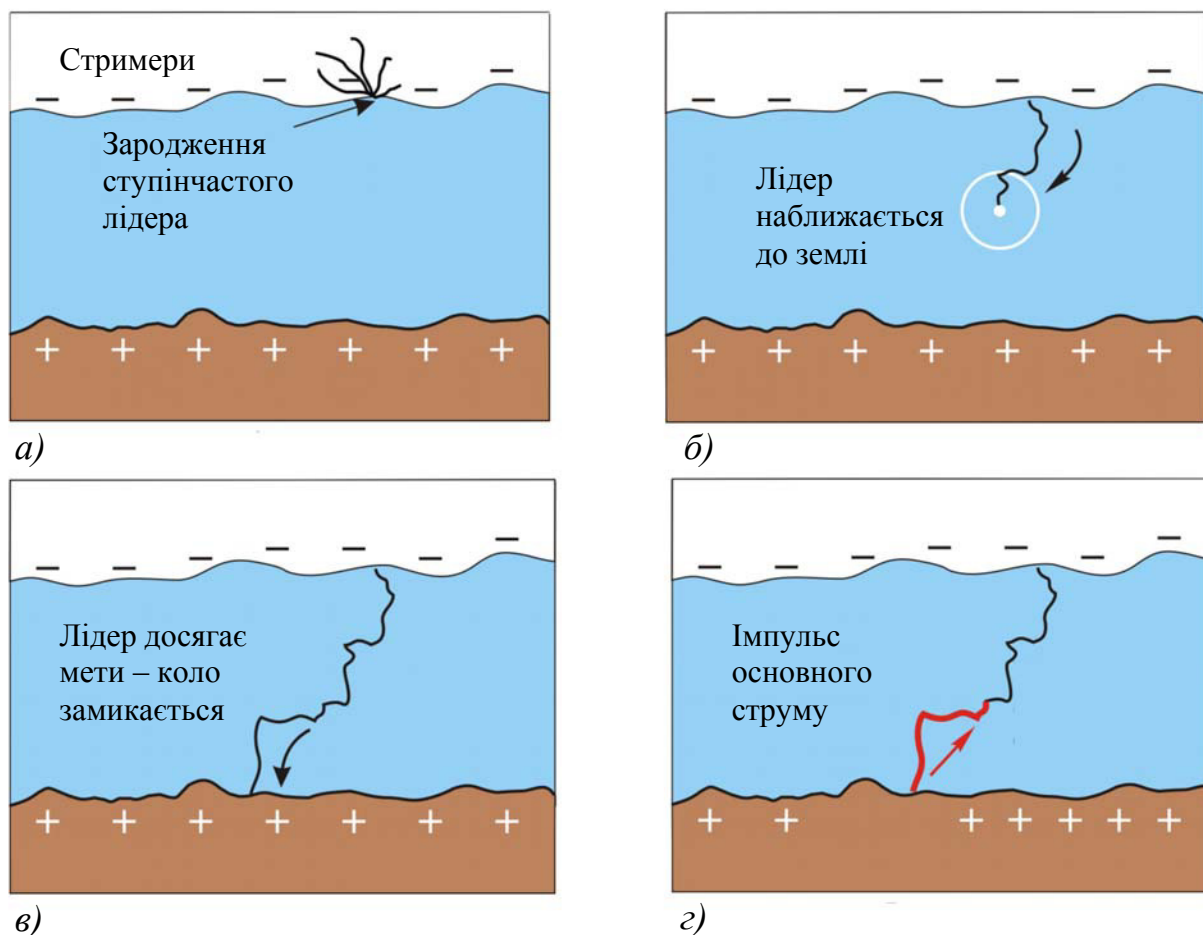


Рис. 2.4. Етапи утворення блискавки

Напруженість поля в області простору безпосередньо перед голівкою лідера істотно більше, ніж в хмарі. Стримери формуються в основі хмари при напруженості поля близько $3 \cdot 10^5$ В/м, а поле перед голівкою лідера має

напруженість до 10^7 В/м. Аналогом лідера може служити металева голка, сполучена дротом з джерелом напруги. Поле поблизу вістря голки буде сильним навіть при відносно невисокій напрузі.

У сильному електричному полі поблизу голівки лідера відбувається інтенсивна іонізація молекул, що перетворює електронейтральне повітря на плазму, що добре проводить. Іонізація відбувається за рахунок, по-перше, бомбардування молекул швидкими електронами, що вилітають з лідера (ударна іонізація), і, по-друге, за рахунок поглинання молекулами фотонів ультрафіолетового випромінювання, що випускається лідером (фотоіонізація). Лідер переміщує в просторі своє сильне поле, і, внаслідок інтенсивної іонізації молекул, що зустрічаються в цьому полі, плазмовий канал стає усе більш довгим.

З урахуванням зупинок по дорозі, лідеру для досягнення землі знадобився час близько $1 \cdot 10^{-3}$ с при відстані 1 км між хмарою і земною поверхнею (рис. 2.4, в). Канал іонізованого повітря так би мовити замкнув хмару із землею накоротко. На цьому лідерна стадія першого імпульсу блискавки закінчується.

Строго кажучи, низхідний лідер не доходить до землі. Під дією поля поблизу голівки лідера з виступаючих на поверхні землі об'єктів (наприклад, щогли, дерева, будівлі) викидається лідер у відповідь (зустрічний) і перехоплює низхідний лідер. Ця особливість низхідної блискавки якраз і використовується для створення блискавичника.

Головна стадія імпульсу починається з моменту зустрічі низхідного і відповідного лідерів. Вона протікає швидко і потужно. По прокладеному лідером шляху спрямовується основний струм (рис. 2.4, г). Імпульс струму триває менше 10^{-4} с. Сила струму досягає 10^5 А. Виділяється значна кількість енергії (до 10^9 Дж). Температура в каналі блискавки досягає 30 тис. ° С. Тут і народжується те надзвичайно яскраве світло, яке ми спостерігаємо при розряді блискавки, і виникає грім внаслідок різкого розширення несподівано нагрітого газу.

Відмітимо, що свічення і розігрівання плазмового каналу розвиваються у разі низхідної блискавки у зворотному напрямі – від землі до хмари. Пояснимо це, розбивши умовно увесь канал на частини. Як тільки канал утворився, вниз (на землю) переміщуються передусім ті електрони, які знаходилися в самій нижній частині каналу, тому нижня частина каналу першою починає світитися і розігріватися. Потім до землі спрямовуються електрони з наступної (вищої) частини каналу. І так поступово – від низу до верху – в рух до землі включаються усі нові і нові електрони. В результаті свічення і розігрівання каналу поширюються в напрямі від низу до верху.

Тобто низхідна блискавка б'є, по суті справи, не з хмари в землю, як це зазвичай вважають, а навпаки, із землі в хмару.

Після того, як пройшов імпульс основного струму, настає пауза тривалістю близько 0,05 с. За цей час канал практично гасне, його температура падає до 1000° С, міра іонізації каналу істотно зменшується.

Проте в хмарі ще зберігся великий заряд, тому новий лідер спрямовується з неї до землі, готуючи дорогу для наступного імпульсу струму. Новий лідер

слідуює по шляху, утвореному початковим лідером, – оскільки на цьому шляху збереглося ще багато іонів. Він без зупинки і без гілкування пробігає увесь шлях від верху до низу. Тепер його називають не ступінчастим (східців більше немає), а стріловидним лідером. І знову слідуює потужний імпульс основного струму, що поширюється по відновленому каналу від низу до верху.

Така у загальних рисах фізика низхідної блискавки. Втім, картина виявляється складнішою. Не завжди стріловидний лідер слідуює точно по шляху, прокладеному попереднім лідером. У якійсь точці він може змінити маршрут. І тоді ми спостерігаємо блискавку у вигляді декількох ламаних ліній.

Оцінки хвильового опору каналу блискавки, зроблені по вимірах струму на Останкінській телевежі, дають значення 1,1-8,0 кОм. Теоретичні дослідження показують, що при гранично великих амплітудах струму блискавки опір зменшується до 300-600 Ом. При таких значеннях хвильового опору каналу блискавки вплив опору заземлення, принаймні до 50 Ом, невеликий, і з достатньою мірою точності для розрахунків захисту від блискавок можна приймати еквівалентний хвильовий опір каналу блискавки нескінченно великим, тобто розглядати блискавку як джерело струму.

Одночасно на земній кулі існує приблизно 2000 грозових осередків, з яких кожену секунду відбувається близько 100 ударів блискавок. Об'єкти, що височать над поверхнею землі, внаслідок розвитку з них зустрічних лідерів збирають удари блискавок з площини, що перевищують їх територію.

Кількість грозових ударів блискавки за 100 годин грози в споруду, наприклад – в підстанцію, довжиною A , шириною B та висотою H може бути розраховано за формулою:

$$N = 6,7(A + 7H)(B + 7H) \cdot 10^{-6}.$$

Кількість ударів блискавки в 100 км повітряної лінії електропередачі за 100 грозових годин:

$$N \approx 4 \cdot h_{cp},$$

де h_{cp} – середня висота підвішування троса або, при відсутності тросів, верхнього дроту.

Повітряні лінії в районах з середньою тривалістю грозової діяльності (20-30 годин на рік) зазнають розрядів блискавки 15-20 разів на рік на 100 км довжини. Струми блискавок змінюються в широких межах – від одиниць до сотень кА. Середній розрахунковий струм блискавки становить 15 кА.

2.1.3. Питання для самоперевірки

1. Що розуміють під кратністю перенапруг?
2. Класифікуйте перенапруги за місцем та причиною виникнення.
3. Які причини виникнення комутаційних перенапруг?
4. Розкрийте механізм утворення блискавки.
5. Поясніть фізичні явища під час лідерної стадії розвитку блискавки.
6. Які процеси супроводжують головну стадію імпульсу блискавки?
7. Яку небезпеку становлять грозові перенапруги?
8. Якими величинами оцінюється хвильовий опір каналу блискавки?

2.2. Грозозахист об'єктів електроенергетики

Блискавичники. Зони захисту блискавичників різних типів. Захисні апарати та пристрої. Захисні проміжки. Трубчасті розрядники. Довгоіскрові розрядники. Вентильні розрядники. Магнітовентильні розрядники. Нелінійні обмежувачі перенапруг.

2.2.1. Блискавичники

Захист від прямих ударів блискавки здійснюється за допомогою блискавичників. Блискавичник є пристроєм, що височіє над об'єктом, що захищається, через який струм блискавки відводиться в землю (рис. 2.5). Блискавичник складається з трьох елементів:

- *блискавкоприймач* – частина блискавичника, призначена для перехоплення блискавок; слугує для прийому розряду блискавки й розташовується в зоні можливого контакту з каналом блискавки. В залежності від особливостей об'єкта захисту, може бути природним (металева покрівля об'єкта, металева ферма тощо) або штучним (спеціально змонтований металевий штир, сітка із провідного матеріалу або металевий трос, натягнутий над об'єктом захисту).

- *струмозводи* – провідники, що слугують для відводу заряду від блискавкоприймача до заземлювача. Вони також можуть бути природними (наприклад, арматура залізобетонних будівельних конструкцій об'єкта захисту) або штучними (зазвичай являють собою провідники досить великого перерізу)

- *заземлювач блискавкозахисту* – провідник або кілька з'єднаних між собою провідників, що мають електричний контакт з ґрунтом; може являти собою, наприклад, заглиблену в ґрунт металеву плиту.

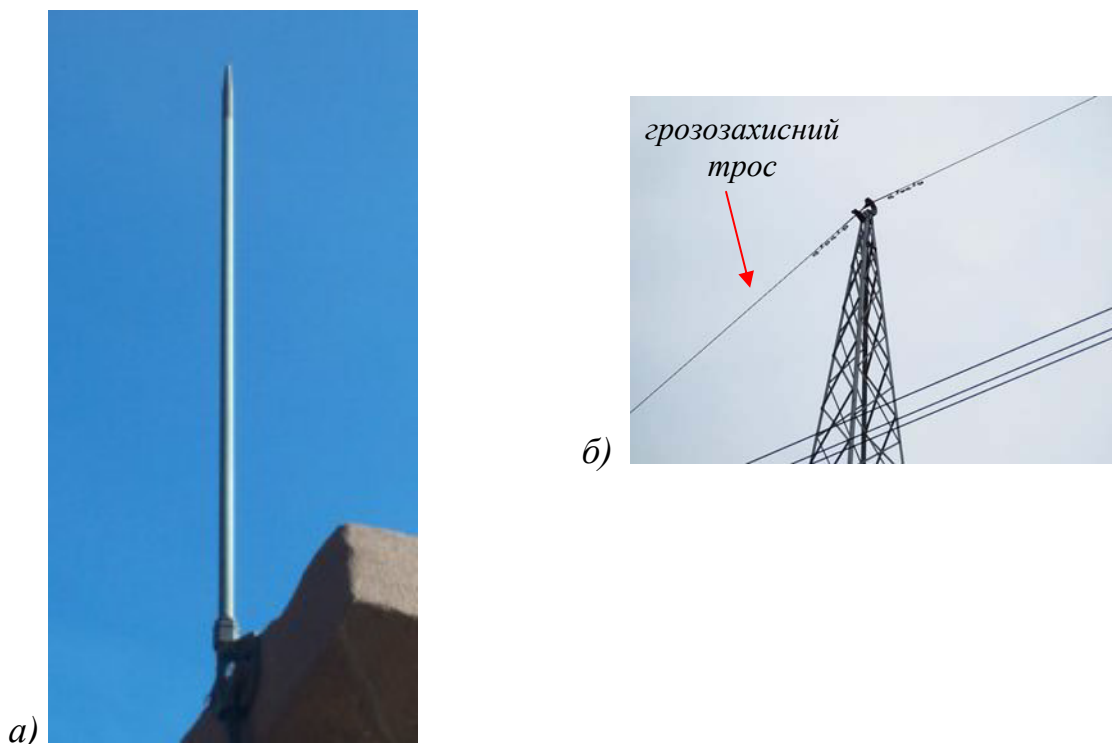


Рис. 2.5. Стержневий (а) та тросовий (б) блискавкоприймачі

Захисна дія блискавичників заснована на тому, що під час лідерної стадії на вершині блискавкоприймача скупчуються заряди і найбільші напруженості електричного поля створюються на шляху між лідером, що розвивається, і вершиною блискавкоприймача. Виникнення і розвиток з блискавичника зустрічного лідера ще більш посилює напруженості поля на цьому шляху, що остаточно зумовлює удар в блискавкоприймач. Об'єкт, що розміщений нижче, ніж блискавичник, виявляється екранованим, і тому практично не може бути уражений блискавкою.

Захисна дія блискавичника характеризується його зоною захисту, тобто простором поблизу блискавичника, імовірність попадання блискавки в яке не перевищує певного досить малого значення.

Блискавичники за типом блискавкоприймачів розділяються на стержневі і тросові (рис. 2.5). Стержневі блискавичники виконуються у вигляді вертикально встановлених стержнів (щогл), сполучених із заземлювачем, а тросові – у вигляді горизонтально підвішених дротів. По опорах, до яких кріпляться трос, прокладаються струмопроводи, що сполучають трос із заземлювачем.

Відкриті розподільні пристрої підстанцій захищаються стержневими блискавичниками, а лінії електропередачі – тросовими. Для захисту шинних мостів і гнучких зв'язків великої протяжності також можуть застосовуватися тросові блискавичники.

2.2.2. Зони захисту блискавичників різних типів

Зона захисту одиночного стержневого блискавкоприймача висотою $h \leq 150$ м являє собою круговий конус (рис. 2.6) з вершиною на висоті $h_0 < h$, перетин якого на висоті h_x має радіус r_x .

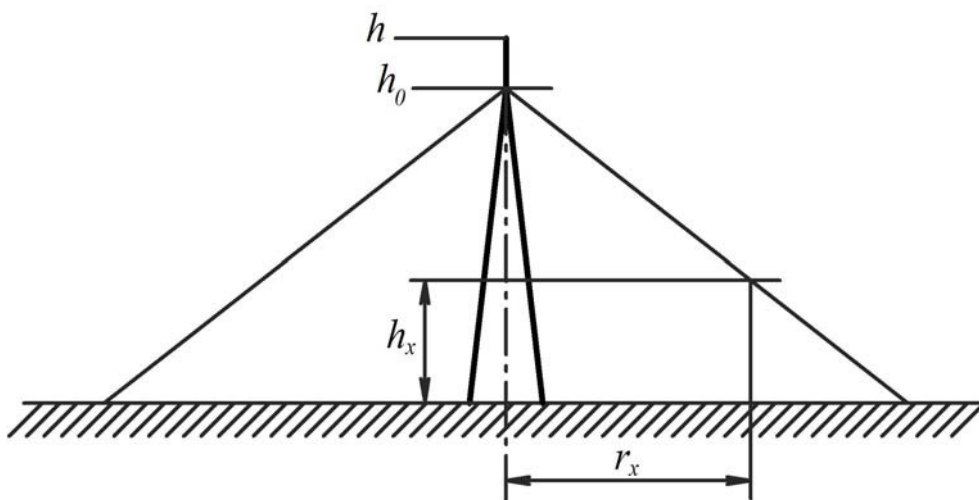


Рис. 2.6. Перетин зони захисту стержневого блискавкоприймача

Межі зони захисту, за умови, що імовірність прориву блискавки через межу зони не перевищує 0,005, визначають за формулами:

$$\begin{cases} h_0 = 0,85h; \\ r_x = (1,1 - 0,002h)(h - h_x/0,85). \end{cases} \quad (2.2)$$

Зона захисту одиночного блискавкоприймача при імовірності прориву 0,05 буде розширюватися і визначається за формулами:

$$\begin{cases} h_0 = 0,92h; \\ r_x = 1,5(h - h_x/0,95). \end{cases} \quad (2.3)$$

При імовірності прориву 0,05 об'єкт висотою до 30м буде уражено блискавкою в середньому не частіше, ніж 1 раз за 200 років експлуатації.

Зона захисту одиночного тросового блискавкоприймача визначається відповідно до залежностей:

при імовірності прориву 0,005:

$$\begin{cases} h_0 = 0,85h; \\ r_x = (1,35 - 0,0025h)(h - h_x/0,85). \end{cases} \quad (2.4)$$

при імовірності прориву 0,05:

$$\begin{cases} h_0 = 0,95h; \\ r_x = 1,7(h - h_x/0,92). \end{cases} \quad (2.5)$$

Для улаштування заземлення застосовуються вертикальні та горизонтальні електроди (заземлювачі). Для *горизонтальних заземлювачів* використовується смугова сталь шириною 20-40 мм та товщиною не менше 4 мм, а також сталь круглого перетину діаметром не менше 6 мм. В якості *вертикальних заземлювачів* використовують сталі труби, стержні та профільна сталь. На підстанції заземлювач являє собою складну систему, що складається з горизонтальних смуг, які об'єднують вертикальні електроди та утворюють сітку на площі, яку займає підстанція. Заземлювач характеризується значенням опору, який ґрунт чинить струму, що стікає. Опір заземлювача визначається його геометричними розмірами та питомим опором ґрунту, в якому він знаходиться.

2.2.3. Захисні апарати та пристрої

Принцип дії захисного апарату полягає в тому, що він запобігає появі на електроустановці імпульсів перенапруг, небезпечних для її ізоляції, і не перешкоджає роботі електроустановки при робочій напрузі.

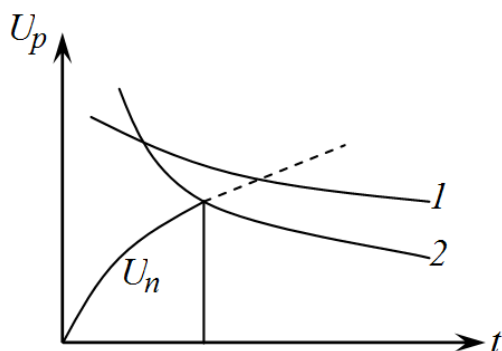


Рис. 2.7. Узгодження вольт-секундних характеристик ізоляції, що захищається, (1) та іскрового проміжку (2); U_n — імпульс перенапруги

Найпростішим захисним пристроєм є *іскровий проміжок*, ввімкнений *паралельно* ізоляційній конструкції. Для попередження перекриття або пробоя ізоляції вольт-секундна характеристика захисного іскрового проміжку з урахуванням розкиду повинна в ідеальному випадку знаходитися нижче від вольт-секундної характеристики ізоляції (рис. 2.7), що захищається. При виконанні цієї вимоги поява небезпечних для ізоляції електроустановок перенапруг неможлива, оскільки при набіганні імпульсу напруги відбувається пробій іскрового проміжку з наступним різким падінням ("зрізом") напруги. Услід за імпульсним струмом через захисний проміжок по іонізованому шляху спрямовується струм, обумовлений напругою промислової частоти, – *супроводжувачий струм*. Якщо електроустановка працює в мережі із заземленою нейтраллю або якщо пробій ізоляційного проміжку стався в двох або трьох фазах, то дуга супроводжувачого струму може не згаснути і імпульсний пробій переходить в стійке коротке замикання, яке викликає аварійне відключення електроустановки. Щоб цього уникнути, слід забезпечити гасіння дуги супроводжувачого струму.

Захисні апарати, що забезпечують не лише захист ізоляції від перенапруг, але і гасіння дуги супроводжувачого струму протягом часу меншого, ніж час дії релейного захисту, дістали назву *захисних розрядників* (рис. 2.8).

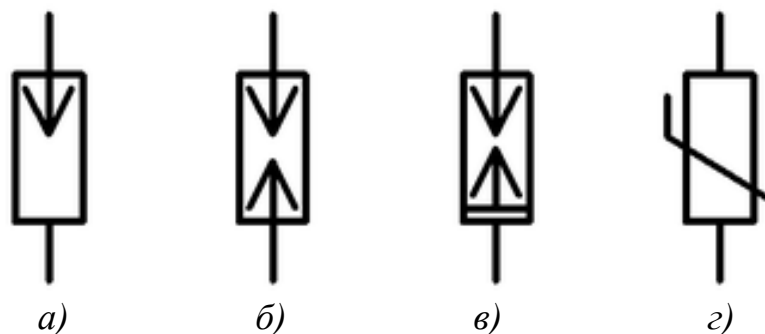


Рис. 2.8. Позначення розрядників на електричних принципових схемах: *а* – загальне позначення; *б* – трубчастий розрядник; *в* – розрядник вентильний або магнітовентильний; *г* – нелінійний обмежувач перенапруг

Є два різні способи гасіння дуги: в трубчастих розрядниках гасіння відбувається в результаті інтенсивного повздовжнього дуття, у вентильних розрядниках – завдяки зниженню значення супроводжувачого струму за допомогою опору, включеного послідовно з іскровим проміжком.

У обмежувачах перенапруг (ОПН – обмежувач перенапруг нелінійний) через дуже велику нелінійність характеристики резистора супроводжувачий струм при робочій напрузі має значення менше міліампера, що безпечно для захисного апарату і не створює помітних втрат енергії. Тому ОПН виконуються без іскрових проміжків.

2.2.3.1. Захисні проміжки

Конструктивно захисні проміжки виконуються у вигляді стержневих електродів, що створюють різконеоднорідне поле (рис. 2.9).

Перехід імпульсного струму при пробії проміжку в стійку дугу може супроводжуватися аварійним відключенням електроустановки або ділянки електричної мережі. Для підвищення надійності електропостачання бажано проміжки встановлювати лише на тих ділянках мережі, які обладнані пристроями автоматичного повторного включення (АПВ).

В установках до 35 кВ захисні проміжки мають невелику довжину. Щоб уникнути випадкового їх замикання (наприклад, птахами) в заземлюючих спусках захисних проміжків створюються додаткові іскрові проміжки. Електроди захисних проміжків в установках 3-10 кВ доцільно виконувати у вигляді рогів, оскільки під дією електродинамічних сил і теплових потоків повітря дуга розтягується і може згаснути. Самозгасання дуги між електродами у вигляді рогів відбувається при струмі в дузі, що не перевищує 300 А.



Рис. 2.9. Кріплення грозотросу з іскровим розрядником

Простота і дешевизна стержневих проміжків визначають їх широке застосування, особливо в мережах нижчих класів напруги. На лініях електропередачі високої і надвисокої напруги приймаються спеціальні заходи по обмеженню внутрішніх перенапруг, тому стержневі проміжки можуть на них застосовуватися для координації, тобто для обмеження максимального значення імпульсу напруги, що набігає на підстанцію, і струму через вентильні розрядники при грозових перенапругах.

Пристрій з дугозахисними рогами (наприклад, типу УЗД) складається з зажиму, рогу та алюмінієвого шунта, який для зручності монтажу та транспортування згорнутий у пружину (рис. 2.10). Дугозахисні роги призначені для відведення дуги на достатню відстань від провідника та ізолятора. Їх рекомендується застосовувати для штирових та опорних ізоляторів.

Конструкція і розміщення дугозахисних пристроїв обираються таким чином, щоб будь-яке тривале однофазне замикання переходило в міжфазне, при

якому автоматичний захист відключає усю повітряну лінію. Після цього автоматичним повторним ввімкненням лінія приводиться в початковий стан. Це ілюструє рис. 2.11. У момент виникнення перенапруги дугове перекриття в першу чергу виникає на поверхні ізолятора (рис. 2.11, 1), після чого під впливом електродинамічних сил дуга переміщується по алюмінієвому дроту, накрученому на шийку ізолятора, навколо шунту до рогу розрядника (2). Під час горіння на кінці рогу дуга іонізує повітря, внаслідок чого виникає міжфазне коротке замикання (3), на яке негайно реагує релейний захист, відключаючи мережу.



Рис. 2.10. Пристрої захисту від дуги УЗД-1.1, УЗД-1.2, УЗД-1.3

Короткочасне однофазне замикання завдяки спіральним шунтам, що захищають дріт в районі ізоляторів, не представляє небезпеки для ізольованого дроту і не призводить до міжфазного замикання і, відповідно, до відключення лінії автоматичним захистом.

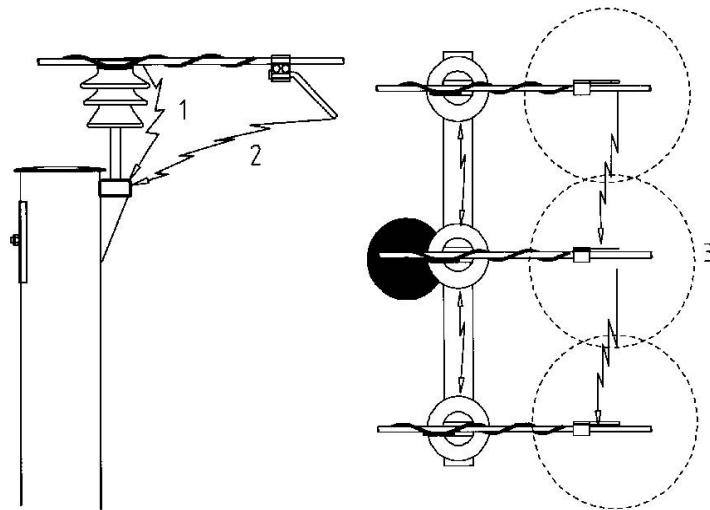


Рис. 2.11. Пристрій з дугозахисними рогами для захисту від грозових перенапруг

2.2.3.2. Трубчасті розрядники

Основу трубчастого розрядника складає трубка з газогенеруючого матеріалу 1 (рис. 2.12). Один кінець трубки заглушений металевою кришкою, на якій укріплений внутрішній стержневий електрод 2. На відкритому кінці трубки розташований інший електрод у вигляді кільця 3. Проміжок S_1 між стержневим і кільцевим електродами називається внутрішнім, або

дугогасильним, проміжком. Трубка відділяється від дроту фази зовнішнім іскровим проміжком S_2 для того, щоб газогенеруючий матеріал трубки постійно не розкладався під дією струмів витoku.

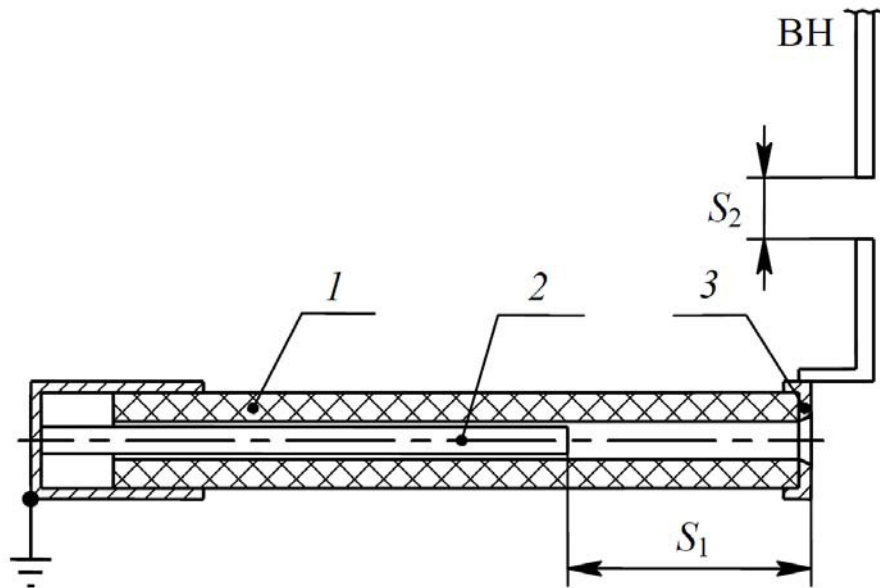


Рис. 2.12. Конструкція трубчастого розрядника: S_1 – основний проміжок; S_2 – зовнішній іскровий проміжок; 1 – діелектрична труба; 2 – стрижневий електрод; 3 – відкритий електрод

Довжина зовнішнього іскрового проміжку обирається за умовами захисту ізоляції і може регулюватися в певних межах. Довжина внутрішнього іскрового проміжку встановлюється відповідно до дугогасильних властивостей розрядника і регулюванню не підлягає.

При дії на трубчастий розрядник імпульсу грозової перенапруги обидва проміжки пробиваються (перекриття по зовнішній поверхні не може статися, оскільки розрядна відстань по цій поверхні багато більша від довжини внутрішнього проміжку) і відбувається обмеження імпульсу напруги. По каналах розряду пробитих проміжків проходить супроводжуючий струм робочої частоти. Під дією високої температури каналу дуги змінного струму в трубці відбувається інтенсивне виділення газу. Тиск в трубці збільшується. Газ, спрямовуючись до відкритого кінця трубки, створюють подовжнє дуття, внаслідок чого дуга гаситься при першому ж проходженні струму через нульове значення. Спрацьовування розрядника супроводжується вихлопом розжарених газів і звуком, що нагадує постріл.

Для успішного гасіння дуги супроводжуючого струму потрібне досить інтенсивне генерування газу в трубці, яке залежить від струму, що проходить. Тому є нижня межа струмів, які надійно відключаються трубчастим розрядником. При великих струмах занадто інтенсивне газоутворення може привести до надмірного підвищення тиску і розриву трубки або зриву наконечників. Тому для трубчастих розрядників встановлюється також верхня межа струмів, що відключаються, при якій гасіння дуги ще не супроводжується механічним ушкодженням розрядника.

Трубчасті розрядники типу РТФ мають фібробакелітову трубку (Р – розрядник, Т – трубчастий, Ф – фібробакелітовий), розрядники типу РТВ або РТВУ – трубки з вініпласту (Р – розрядник, Т – трубчастий, В – вініпластовий, У – посилений). Для підвищення механічної міцності фіброва трубка обмотується згори бакелізованим папером і покривається вологостійким лаком. Трубчасті розрядники, як правило, забезпечують 7-8 успішних спрацювань, після чого газогенеруюча трубка не забезпечує необхідного тиску газів та дугогасильної здатності. Вініпластова газогенеруюча трубка вигорає скоріше ніж фібробакелітова. Для визначення кількості спрацювань розрядники обладнуються однократними або багатократними показниками спрацювання.

2.2.3.3. Довгоіскрові розрядники

Розрядник довгоіскровий (РДІ) – апарат для захисту від перенапруг, принцип дії якого заснований на використанні ефекту ковзного розряду, який забезпечує велику довжину імпульсного перекриття по поверхні розрядника, і запобігання за рахунок цього переходу імпульсного перекриття в силову дугу струму промислової частоти (рис. 2.13).

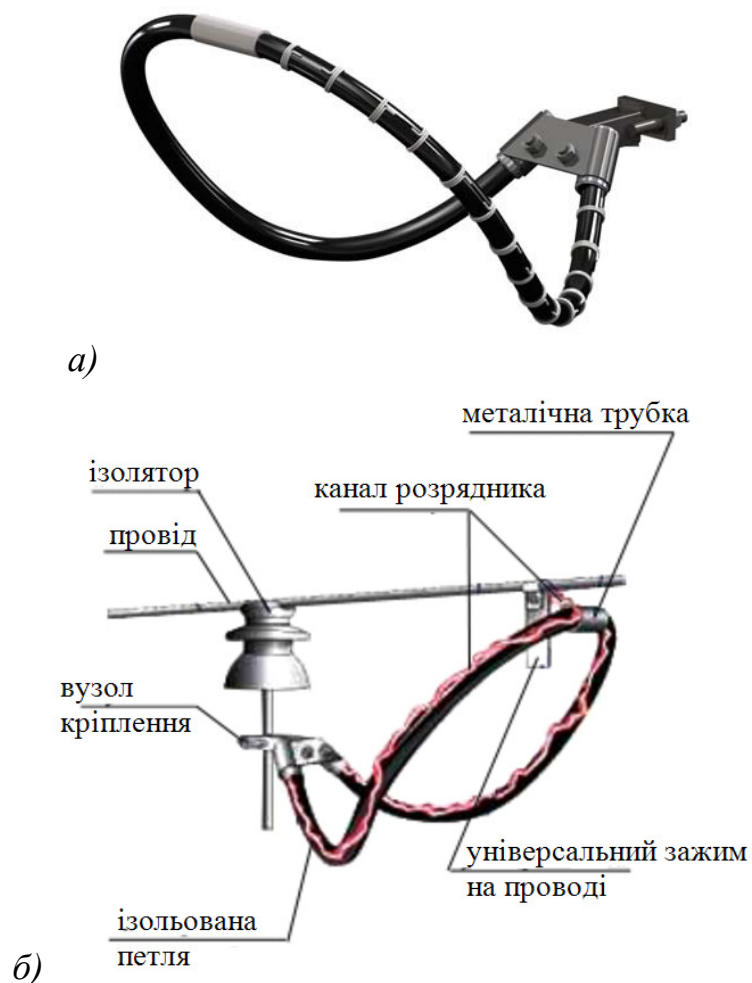


Рис. 2.13. Довгоіскровий розрядник:
а – загальний вигляд; б – схема кріплення

Принцип роботи розрядника заснований на використанні ефекту ковзного розряду, який забезпечує велику довжину імпульсного перекриття по поверхні розрядника, і запобігання за рахунок цього переходу імпульсного перекриття в силову дугу струму промислової частоти. Розрядний елемент, уздовж якого розвивається ковзний розряд, має довжину, що у декілька разів перевищує довжину ізолятора лінії, що захищається. Конструкція розрядника забезпечує його нижчу імпульсну електричну міцність в порівнянні з ізоляцією, що захищається. Головною особливістю довгоіскрового розрядника є те, що внаслідок великої довжини імпульсного грозового перекриття імовірність встановлення дуги короткого замикання зводиться до нуля. Основна перевага довгоіскрового розрядника полягає в тому, що розряд розвивається уздовж апарату по повітрю, а не всередині нього. Це дозволяє значно збільшити термін експлуатації виробів і підвищує їх надійність.

2.2.3.4. Вентильні розрядники

Вентильний розрядник – апарат для обмеження перенапруг, який підключається до електричної мережі через іскрові проміжки та робочі елементи якого виготовлені на основі нелінійних резисторів (варисторів). Варистор – нелінійний резистор, за нормальної напруги промислової частоти має високий опір, а при перенапругах – має малий опір.

Вентильний розрядник складається з іскрових проміжків (1) і нелінійних резисторів (2), що розміщені у герметично закритому фарфоровому корпусі (3), який захищає внутрішні елементи розрядника від дії зовнішнього середовища і забезпечує стабільність характеристик (рис. 2.14).

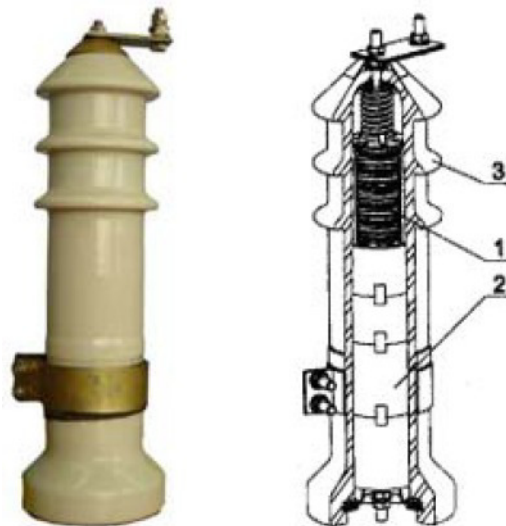


Рис. 2.14. Конструкція вентильних розрядників типу РВО на напругу 6/10 кВ (Р – розрядник; В – вентильний; О – облегований)

При дії на вентильний розрядник імпульсу грозової перенапруги пробивається іскровий проміжок і через розрядник проходить імпульсний струм, що створює падіння напруги на опорі резистора. Завдяки нелінійній

вольт-амперній характеристиці це падіння напруги мало змінюється при істотній зміні імпульсного струму.

Слідом за імпульсним струмом через розрядник проходить супроводжуючий струм промислової частоти. Опір нелінійного резистора при робочій напрузі різко зростає, супроводжуючий струм істотно обмежується і під час переходу його через нульове значення дуга в іскровому проміжку згасає.

2.2.3.5. Магнітовентильні розрядники

Магнітовентильний розрядник складається з декількох послідовних блоків з магнітним іскровим проміжком і відповідного числа вілітових дисків. Кожен блок магнітних іскрових проміжків є почерговим з'єднанням одиничних іскрових проміжків і постійних магнітів, що розміщені у фарфоровому циліндрі. При пробі в одиничних іскрових проміжках виникає дуга, яка за рахунок дії магнітного поля, що створюється кільцевим магнітом, починає обертатися з великою швидкістю, що забезпечує більш швидке, в порівнянні з вентильними розрядниками, дугогасіння.

Блок магнітних іскрових проміжків складається з набору одиничних іскрових проміжків 2, розділених між собою кільцевими магнітами 3 (рис. 2.15). Одиничний іскровий проміжок складається з двох концентрично розташованих мідних електродів 6 і 8, між якими утворюється кільцева щілина 7. Дуга, що виникає в щілині, обертається під дією постійних магнітів з великою швидкістю, що сприяє її швидкому гасінню. Набір з постійних магнітів і одиничних іскрових проміжків розміщується всередині фарфорової покришки 1, що закрита сталевими кришками 5. Магніти і мідні електроди щільно стискаються сталевією пружиною 4.

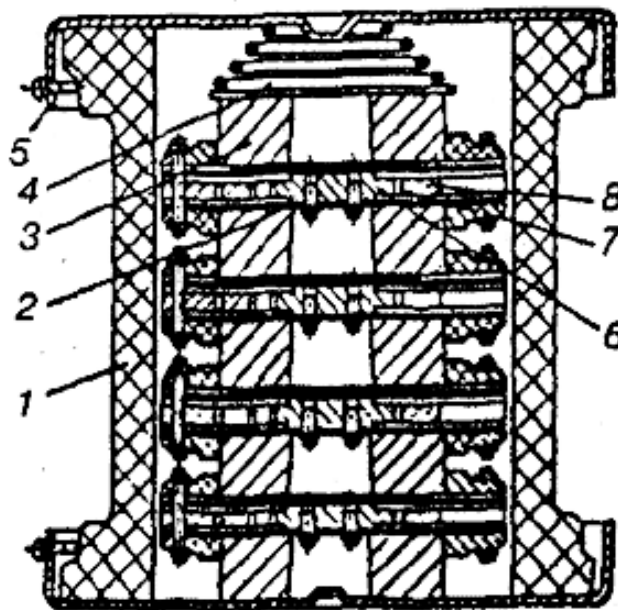


Рис. 2.15. Перетин магнітовентильного розрядника

2.2.3.6. Нелінійні обмежувачі перенапруг

Обмежувач перенапруг нелінійний (ОПН) – апарат для обмеження перенапруг, який підключається до електричної мережі без іскрових проміжків та робочі елементи якого виготовлені на основі високонелінійних металооксидних резисторів (варисторів).

Основний недолік вентильних розрядників пов'язаний з тим, що резистори на основі карборунда мають порівняно невисоку нелінійність. Застосування резисторів на основі окислу цинку, що мають значно більшу нелінійність, ніж резистори на основі карборунда, дозволило створити нелінійний обмежувач перенапруг. Перевагами ОПН є можливість глибокого обмеження перенапруг, у тому числі міжфазних, малі габарити, що дозволяють використовувати їх як опорні ізоляційні колони, велика пропускна спроможність.

Рівень обмеження комутаційних перенапруг за допомогою ОПН складає $(1,65 \div 1,8)U_{\phi}$. Рівень обмеження грозових перенапруг складає $(2,2 \div 2,4)U_{\phi}$ в мережах 110 кВ і знижується до $2U_{\phi}$ для ліній електропередачі 750 кВ.

Обмежувачі комплектуються у вигляді паралельно сполучених колонок з дисків діаметром 28 і заввишки 8 мм. Торці дисків металізовані і забезпечують контакт між дисками. Відповідно до пропускної спроможності число паралельних колонок резисторів в ОПН варіюється від чотирьох в обмежувачі перенапруг на 110 кВ до 30 в обмежувачі на 750 кВ (рис. 2.16).



а)



б)

Рис. 2.16. Обмежувач перенапруг типу ОПНн-750:
а – в лабораторії; б – у складі ОРУ-750 кВ на Запорізькій АЕС

Розрядник без іскрових проміжків має особливу швидкість спрацьовування: при виникненні перенапруг опір такого розрядника різко знижується, зростаючи відразу після проходження заряду (менш ніж за 1 нс). При цьому зберігається стабільність характеристики варисторів після багатьох спрацьовувань аж до закінчення зазначеного терміну експлуатації, що усуває необхідність в експлуатаційному обслуговуванні.

ОПН 6-110 кВ з полімерною ізоляцією, в порівнянні з вентильними розрядниками, мають наступні переваги:

- варистори, що використовуються в ОПН, мають високу стабільність, яка не змінюється в процесі тривалої експлуатації;
- велика швидкодія спрацьовування ОПН при комутаційних і грозових перенапругах;
- застосування варисторів в одноколунковому виконанні дозволяє забезпечити особливо глибоке обмеження напруги і, відповідно, вищу надійність роботи устаткування і поліпшення параметрів мережі;
- зменшення габариту і ваги ОПН в 10-20 разів дозволяє встановити їх безпосередньо поблизу устаткування, що захищається;
- висока механічна міцність і мала маса ОПН дозволяє встановлювати їх на повітряних лініях 6-110 кВ без посилення конструкції опор;
- ОПН в полімерному корпусі не вимагають спеціального обслуговування, не ушкоджуються при транспортуванні і зберіганні;
- малі масо-габарити ОПН дозволяють легко виконувати їх монтаж при мінімальному використанні техніки.

2.2.4. Питання для самоперевірки

1. Розкрити призначення та конструкцію блискавичника.
2. Яким чином визначається зона захисту блискавичників різних типів?
3. Здійснити критичний аналіз засобів захисту від грозових перенапруг.
4. Як узгоджуються вольт-секундні характеристики ізоляції обладнання та іскрового проміжку?
5. Розкрити конструкцію та принцип дії трубчастого розрядника.
6. Проаналізувати улаштування та принцип дії довгоіскрового розрядника.
7. Як улаштований вентильний розрядник?
8. Описати характерні особливості функціонування магнітовентильного розрядника.
9. Проаналізувати конструкцію та принцип дії нелінійного обмежувача перенапруг.

2.3. Комутаційні перенапруги в електричних мережах

Загальна характеристика комутаційних перенапруг. Перенапруги перехідного процесу при ввімкненні розімкненої лінії. Перенапруги перехідного процесу при автоматичному повторному ввімкненні. Перенапруги перехідного процесу при відключенні конденсаторів та ненавантажених ліній. Перенапруги перехідного процесу при відключенні великих струмів. Перенапруги при відключенні малих індуктивних струмів. Перенапруги перехідного процесу при переміжних замиканнях на землю. Обмеження комутаційних перенапруг. Основні принципи побудови захисту від комутаційних перенапруг. Класифікація заходів захисту. Кероване ввімкнення повітряної лінії. Програмоване ввімкнення лінії. Застосування резисторів у вимикачах. Нелінійні обмежувачі для захисту від перенапруг.

2.3.1. Загальна характеристика комутаційних перенапруг

Електричні мережі високої напруги мають коливальні властивості, оскільки містять зосереджені і розподілені індуктивності і ємності. У нормальному режимі передачі потужності ці коливальні властивості не проявляються. Однією з причин виникнення коливань електричної і магнітної енергій, що запасуються в реактивних елементах мережі, є планові і аварійні комутації. Кожна комутація викликає перехідний процес, що часто супроводжується перенапругами, які можуть привести до перекриття ізоляції. Серед таких комутацій в першу чергу слід назвати відключення ненавантажених ліній з повторними запаленнями у вимикачі, відключення ліній при асинхронному ході генераторів, автоматичне повторне включення тощо.

Перенапруги, що виникають при комутаціях, називають **комутаційними**. Їх максимальні значення залежать від багатьох чинників, серед яких важливу роль грають схема електричної мережі, характеристики вимикача. Окрім комутаційних перенапруг, що виникають під час перехідного процесу в результаті спрацювання комутаційних апаратів (вимикачів, роз'єднувачів, короткозамикачів тощо), можливе виникнення перенапруг через перехідні процеси, наприклад, при перекритті ізоляції лінії в результаті удару блискавки в лінію або при нестійкому горінні дуги в місці однофазного короткого замикання в мережі з ізольованою або резонансно-компенсованою нейтраллю (послідовне запалення і згасання дуги є свого роду комутатором) тощо.

Комутаційні перенапруги прийнято поділяти на наступні **види**:

- 1) **фазні**, що впливають на ізоляцію струмопровідних частин по відношенню до землі;
- 2) **міжфазні**, що впливають на ізоляцію між струмопровідними частинами різних фаз;
- 3) **міжконтактні**, які виникають між розімкненими контактами комутаційних апаратів (вимикачів, роз'єднувачів).

При проектуванні ізоляційних конструкцій використовують наступні дані:

1) максимальне значення перенапруги U_{max} або кратність $k = U_{max} / U_{роб.найб.}$, тобто відношення максимального значення перенапруження до амплітуди відповідної найбільшої допустимої робочої напруги;

2) форму кривої перенапруги, яка дозволяє визначити тривалість дії на ізоляцію;

3) склад електроустаткування електричної мережі, що схильна до дії цього виду перенапруги.

Перераховані характеристики мають великий статистичний розкид, оскільки їх значення залежать від великого числа факторів, деякі з яких є випадковими величинами. Тому істотне значення для розрахунку необхідного рівня ізоляції має те, наскільки часто з'являються перенапруги, що перевищують задану кратність протягом певного інтервалу часу (наприклад, впродовж року), або Т-річний рівень перенапруг, тобто така кратність перенапруг, яка може бути досягнута або перевищена в середньому 1 раз в Т років.

Багато видів комутаційних перенапруг підлягають обмеженню. Техніко-економічне обґрунтування заходів захисту від перенапруг включає оцінку статистичних характеристик збитку (математичне сподівання і дисперсію) внаслідок ушкодження, простою або позачергового ремонту електроустаткування мережі, а також внаслідок псування устаткування, браку продукції, порушення технологічного процесу у споживачів.

2.3.2. Перенапруги перехідного процесу при ввімкненні розімкненої лінії

Перехідний процес, що виникає при підключенні лінії до шин станції або підстанції, можна проаналізувати за допомогою схеми на рис. 2.17, де розімкнена лінія довжиною l підключається до джерела синусоїдної ЕРС $e(t) = E_m \sin(\omega t + \varphi)$ із внутрішньою індуктивністю L_u .

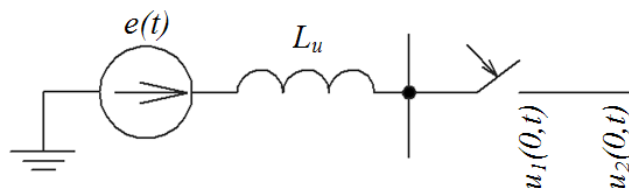


Рис. 2.17. Підключення розімкненої лінії до джерела $e(t) = E_m \sin(\omega t + \varphi)$

Максимальне значення напруги має місце в кінці лінії. Напруга в кінці лінії включає безліч гармонік (рис. 2.18, 2.19):

$$u(l,t) = A_{ycm} \sin(\omega t + \varphi) - \sum_{k=1}^{\infty} A_k e^{-\delta_k t} \sqrt{\sin^2 \varphi + \left(\frac{\omega}{\omega_k} \cos \varphi \right)^2} \sin(\omega_k t + \varphi_k), \quad (2.6)$$

де $A_{уст}$ – амплітуда вимушеної складової; A_k – амплітуди вільних складових; ω_k – кутові частоти власних коливань; $\varphi_k = \arctg\left[\frac{\omega_k}{\omega} \operatorname{tg} \varphi\right]$; δ_k – коефіцієнт згасання.

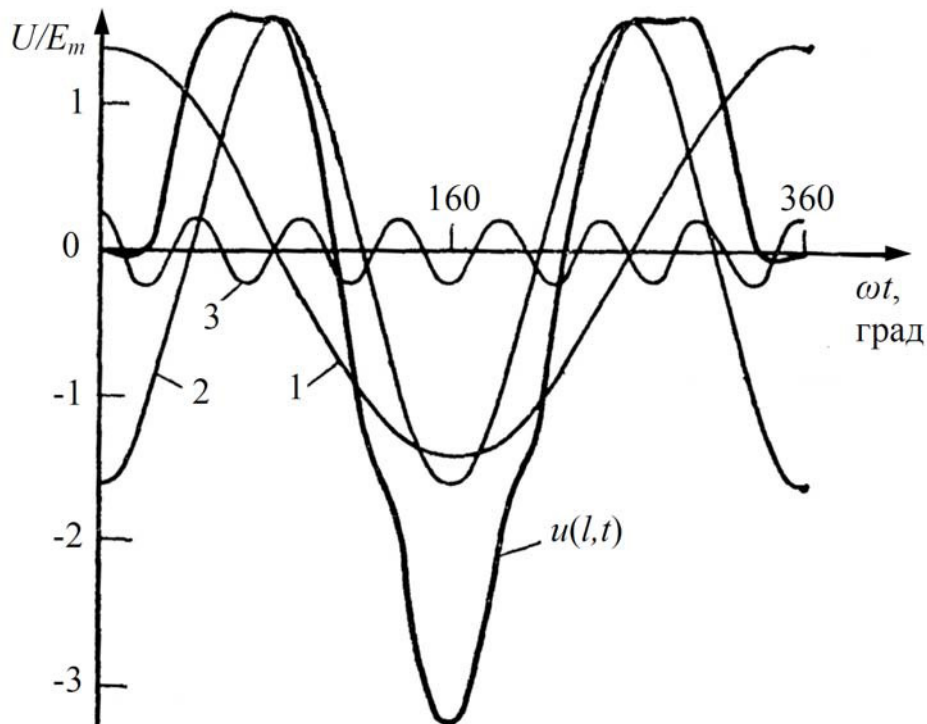


Рис. 2.18. Складові напруги в кінці розімкненої лінії:
1 – вимушена складова; 2 – перша гармоніка; 3 – друга гармоніка

Обчислення коефіцієнтів згасання δ_k є складним завданням. За даними вимірів на діючих лініях електропередачі 500 кВ середнє значення δ_k може бути оцінене в 30 1/с, або приблизно 0,1 1/рад, що відповідає зменшенню амплітуди вільних коливань за період T промислової частоти на 45%. В експлуатації найбільше значення має ударний коефіцієнт $K_{уд} = U_{max}/A_{уст}$, що характеризує перенапруги. Відповідно до (2.6) ударний коефіцієнт залежить від фази включення лінії. На рис. 2.20 представлені залежності $K_{уд}(\varphi)$ при різних частотах. Видно, що чим більше кут включення відрізняється від 90° , тим менше амплітуди власних коливань. Чим ближче частота власних коливань до частоти джерела, тим пізніше настає приблизний збіг максимумів $A_{уст}$ і A_k , а отже, і максимум перехідного процесу. В цьому випадку великий вплив здійснює коефіцієнт згасання. У міру наближення частоти вільних коливань до частоти джерела ударний коефіцієнт знижується. Загальний характер кривих на рис. 2.20 порушує випадок $\omega_1/\omega=3$, коли при $\varphi=90^\circ$ максимуми вимушеної і вільної складових не співпадають.

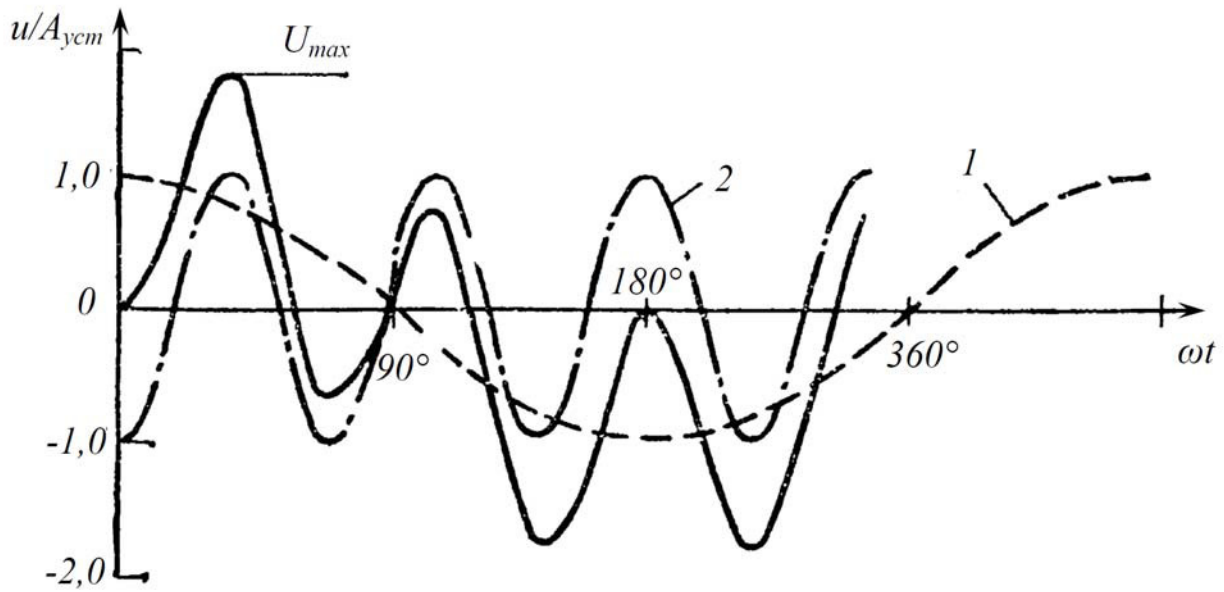


Рис. 2.19. Перехідний процес при відключенні лінії:
1 – вимушена складова; 2 – вільна складова

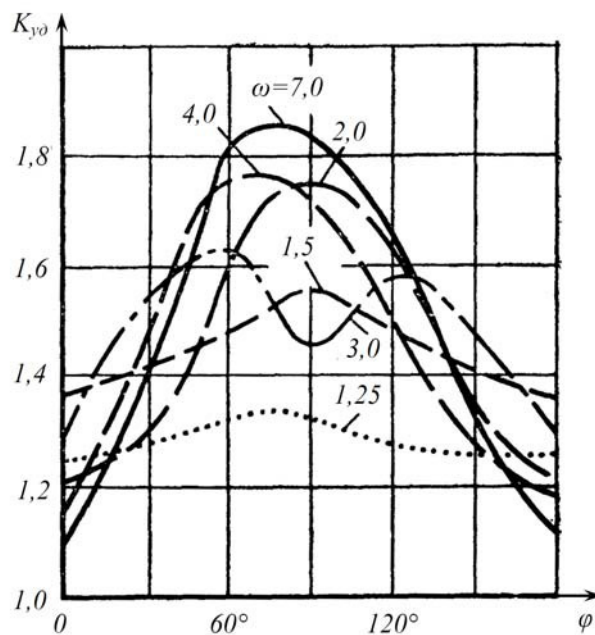


Рис. 2.20. Залежність ударного коефіцієнта $K_{уд}$ від фази ввімкнення φ
при $\delta = 30$ 1/с для кривих $\omega = \omega_1/314$

Крива $K_{уд}(\varphi)$ для лінії йде дещо вище, ніж для еквівалентного коливального контуру, за рахунок вищих гармонік і перевищення амплітуди коливань першої власної частоти над амплітудою вимушеної складової. Ця відмінність, як правило, проявляється при великих потужності джерела і довжині лінії. Наявність реакторів поперечної компенсації збільшує ударний коефіцієнт переважно в області максимуму, а наявність поздовжньої

компенсації вирівнює криву $K_{y0}(\varphi)$, тобто зменшує ударний коефіцієнт поблизу максимуму і збільшує його значення при включенні поблизу нульового значення ЕРС. Це пояснюється впливом субгармонійної складової.

При включенні блокових схем трансформатор-лінія без вимикача на стороні лінії перехідний процес супроводжується появою вільної складової магнітного потоку трансформатора; збіг вільної складової магнітного потоку з вимушеною приводить через півперіоду промислової частоти до насичення магнітного кола і до появи вищих гармонік. Зокрема, у ряді випадків відмічена поява високих амплітуд другою і деяких інших парних гармонік. Зважаючи на те що вільна складова магнітного потоку затухає повільно (десятки періодів промислової частоти), перехідний процес виходить затяжним і характеризується значними перенапругами. Це явище дістало назву "перехідного резонансу" і через значну тривалість представляє небезпека для ізоляції і вентильних розрядників.

2.3.3. Перенапруги перехідного процесу при автоматичному повторному ввімкненні

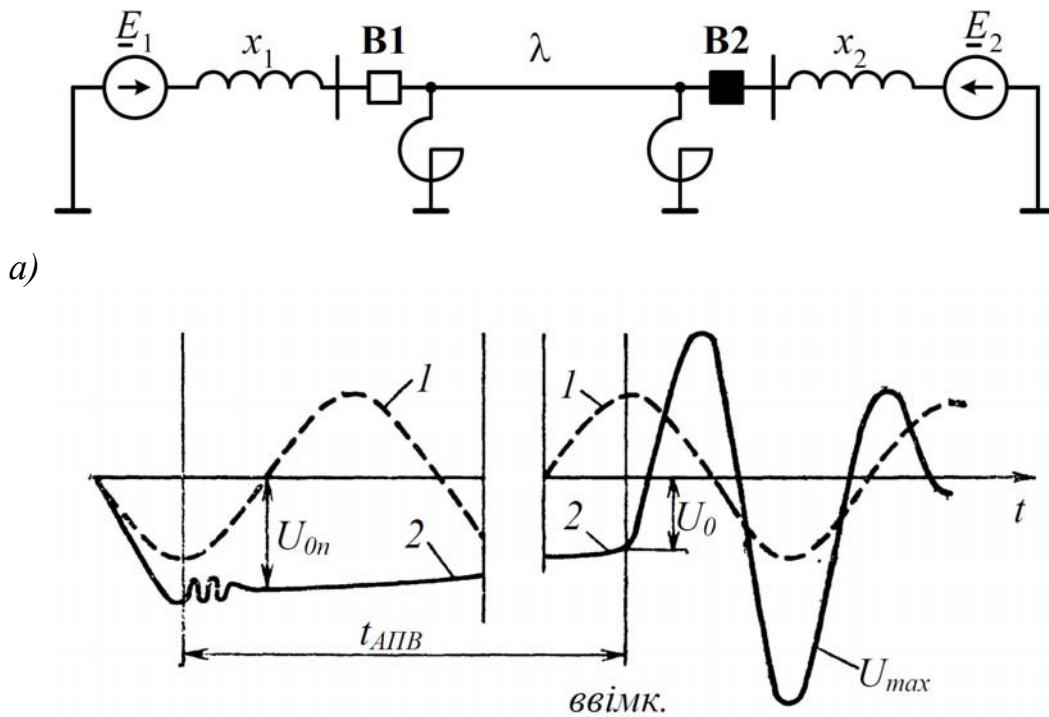
Використання АПВ засноване на тому, що більшість замикань носять дуговий характер. Тому при відключенні ділянки лінії за наявності КЗ з двох сторін дуга може згаснути і лінія може бути знову включена через час $t_{АПВ}$ (рис. 2.21).

Припустимо, що КЗ сталося на лінії біля вимикача В2. Цикл АПВ можна підрозділити на наступні етапи:

- відключення лінії вимикачем В2, найближчим до місця КЗ, що призводить до короткочасного режиму одностороннього живлення лінії;
- відключення неушкоджених фаз лінії вимикачем В1, тобто обрив струму ємності під час переходу його через нульове значення, що відповідає максимуму напруги на цих фазах;
- повторне включення розімкненої лінії вимикачем В1;
- замикання вимикача В2 і відновлення нормальної схеми електропостачання.

Після відключення вимикача В2 напруги на неушкоджених фазах на початку і у кінці лінії відрізняються один від одного і від ЕРС джерела внаслідок ємнісного ефекту і КЗ на пошкодженій фазі (поперечна несиметрія лінії).

Після відключення лінії вимикачем В1 заряд на пошкодженій фазі стікає в землю через дугу, а на неушкоджених фазах відбувається процес вирівнювання напруги. Заряд на неушкоджених фазах лінії без реакторів поперечної компенсації повільно стікає в землю через активну провідність, яка визначається мірою забруднення поверхні ізоляторів і метеорологічними умовами. В середньому для сухої погоди при $t_{АПВ} = 0,4\text{с}$ напруга зарядів, що залишилися, складає 60-70% первинної.



б)
Рис. 2.21. Перехідний процес при ввімкненні розімкненої лінії в циклі АПВ:
а – схема; б – криві напруги: 1 – ЕРС джерела; 2 – напруга на лінії

Максимальні перенапруги виникають при повторному включенні розімкненої лінії вимикачем В1. Напруга перехідного процесу може бути знайдена методом суперпозиції, тобто підсумовуванням двох напруги:

- напруги при включенні незарядженої лінії;
- напруги при саморозряді лінії з початковою напругою U_0 через індуктивність джерела.

Напруга перехідного процесу може бути виражена залежністю:

$$u(l, t) = A_{ycm} \sin(\omega t + \varphi) + \sum_{k=1}^{\infty} A_k e^{-\delta_k t} \sqrt{\left(\sin \varphi + \frac{U_0}{A_k} \right)^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_k} \cos \varphi \right)^2} \sin(\omega_k t + \varphi_k), \quad (2.7)$$

де $\varphi_k = \arctg \left(\frac{\omega_k \sin \varphi + U_0 / A_k}{\omega \cos \varphi} \right)$.

В останньому виразі в інтервалі кутів включення φ від 0 до 180° знаки U_0 і ЕРС джерела протилежні, а в інтервалі 180-360° вони мають один і той же знак.

Залежність $K_{y\delta} = f(\varphi)$ наведена на рис. 2.22 для випадку $\omega_1/\omega = 2$, $E = 1$, $U_0 = 1$. Для порівняння пунктиром проведена крива $K_{y\delta} = f(\varphi)$ при включенні незарядженої лінії ($U_0 = 0$). Видно, що максимальний ударний коефіцієнт при АПВ значно зростає за рахунок напруги заряду, що залишається.

Якщо на лінії включені реактори поперечної компенсації, то після відключення вимикача В1 ємність лінії починає розряджатися через

індуктивність реакторів з частотою меншою, ніж частота джерела. Внаслідок високої добротності реакторів коливальний процес затухає дуже повільно і за час $t_{АПВ}$ не встигає закінчитися.

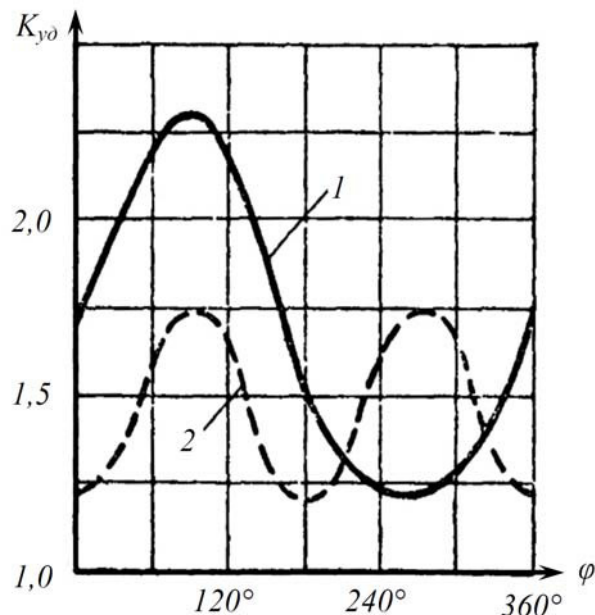


Рис. 2.22. Залежність $K_{y\partial}$ від фази ввімкнення φ при ввімкненні лінії в циклі АПВ:

$$1 - U_0=1; 2 - U_0=0$$

2.3.4. Перенапруги перехідного процесу при відключенні конденсаторів та ненавантажених ліній

Значні комутаційні перенапруги можуть виникати не лише при включеннях, але і при відключеннях ненавантажених ліній і конденсаторних батарей.

Розглянемо випадок **відключення зосередженої ємності**, наприклад батареї конденсаторів C , від джерела (рис. 2.23, а). При відключенні після початку розходження контактів вимикача між ними деякий час продовжує горіти дуга. Припустимо, що струм ємності досить великий, так що дуга гасне тільки у момент природного переходу струму через нуль. До відключення напруга на ємності становила:

$$\underline{U}_C = \underline{E} \frac{-jx_C}{-jx_C + jx_L} = \underline{E} \frac{\omega_1^2}{\omega_1^2 - \omega^2}, \quad (2.8)$$

де $\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ – власна частота схеми; L – індуктивність джерела.

Зазвичай ω_1 є набагато більшою частоти джерела ω , тобто $\frac{\omega_1^2}{\omega_1^2 - \omega^2} \approx 1$,

відповідно:

$$\underline{U}_C \approx \underline{E}. \quad (2.9)$$

Після обриву дуги напруга на ємності не змінюється, зберігаючи практично своє максимальне значення $U_{C.max} = -E_m$ (рис. 2.23, б).

Різниця

$$e(t) - u_C(t) = E_m(1 - \cos \omega t) \quad (2.10)$$

є **відновною напругою** на вимикачі, яка через півперіоду досягає $2E_m$.

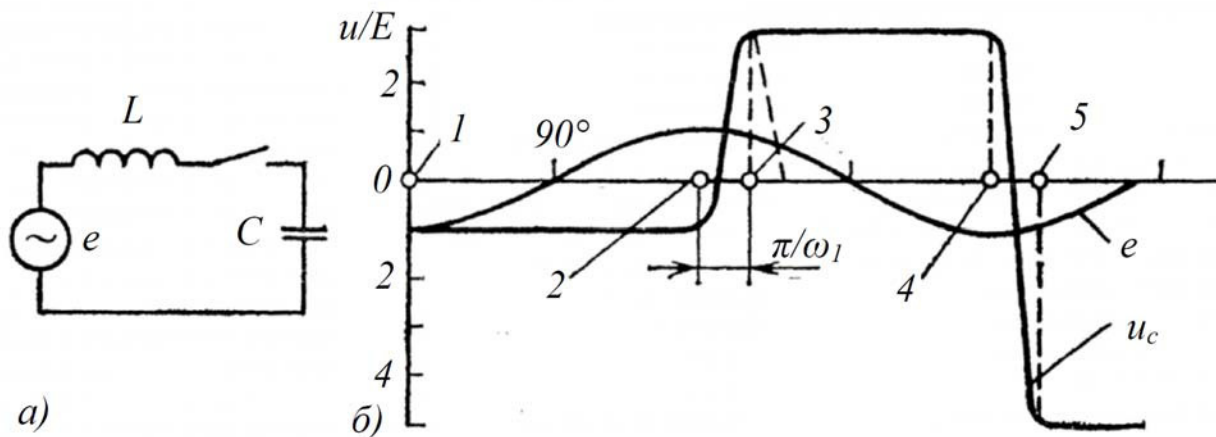


Рис. 2.23. Напруга на ємності при повторних запалюваннях дуги у вимикачі:
а – розрахункова схема; б – криві напруги перехідного процесу при запаленні дуги в
моменти проходження ЕРС через максимум

Після обриву струму електрична міцність міжконтактного проміжку поступово зростає у зв'язку з розходженням контактів. Повітряні вимикачі з їх швидким переміщенням контактів і інтенсивним дуттям мають спочатку значно швидше зростання електричної міцності, аніж оливні вимикачі. Гранична ж міцність у вимикачів обох типів практично однакова. На рис. 2.24 показані залежності пробивної напруги між контактами від часу, який пройшов після обриву струму, для повітряних і оливних вимикачів 110 кВ. Слід зазначити, що криві, приведені на рис. 2.24, є наближеними; експерименти з визначення відновної міцності вимикачів виявляють дуже великий розкид значень, який визначається не лише відомим статистичним характером пробою, але і дисперсією швидкості розходження контактів, інтенсивністю дуття, а також фазою струму у момент початку розходження контактів.

Якщо в процесі розходження контактів відновна напруга між контактами виявиться вище, ніж міцність міжконтактного проміжку, то виникає пробій проміжку. Наступний обрив струму може статися при першому проходженні струму через нульове значення.

В подальшому поява великої відновної напруги може знову викликати пробій проміжку, тобто комутація відключення може бути серією почергових

відключень і включень, які відбуваються до тих пір, поки при повній розбіжності контактів дуга остаточно не обірветься.

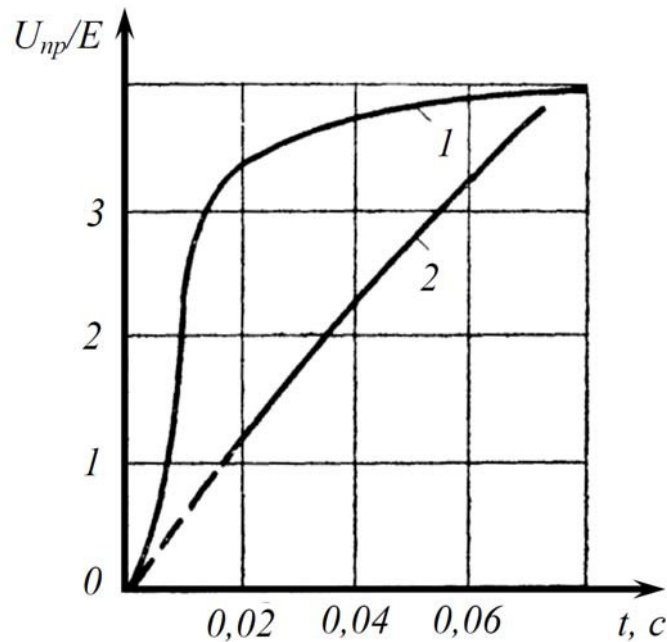


Рис. 2.24. Наростання електричної міцності вимикача при відключенні:
1 – повітряний вимикач; 2 – оливний вимикач

Розглянемо ідеалізований випадок, коли *повторне запалення дуги відбувається при максимумі напруги промислової частоти*. Коливальний контур LC , ємність якого заряджена до напруги $-E_m$, підключається до ЕРС $e(t) = E_m \sin(\omega t + 90^\circ)$. У колі виникають коливання з частотою $\omega_1 = 1/\sqrt{LC}$, яка при невеликій довжині лінії може виявитися значно вище за частоту $\omega = 314$ рад/с. Перехідний процес при повторному запаленні повністю аналогічний процесу при АПВ, і тому напругу на ємності можна розрахувати за наступною формулою, яка враховує початкову напругу U_0 на ємності:

$$u_C(t) = E_m \frac{\omega_1^2}{\omega_1^2 - \omega^2} \left[\sin(\omega t + \varphi) - e^{-\delta t} \times \right. \\ \left. \times \sqrt{\left(\sin \varphi + \frac{U_0}{E_m} \frac{\omega_1^2 - \omega^2}{\omega_1^2} \right)^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_1} \cos \varphi \right)^2} \cdot \sin(\omega_1 t + \varphi_1) \right], \quad (2.11)$$

$$\text{де } \varphi_1 = \arctg \left[\frac{\omega_1}{\omega} \frac{\sin \varphi + \frac{U_0}{E_m} \frac{\omega_1^2 - \omega^2}{\omega_1^2}}{\cos \varphi} \right].$$

Якщо прийняти $\varphi=90^\circ$ та врахувати, що $\frac{\omega_1^2 - \omega^2}{\omega_1^2} \approx 1$, то без врахування затування:

$$u_C(t) = E_m \cos \omega t - 2E_m \cos \omega_1 t. \quad (2.12)$$

Струм через вимикач:

$$i = C \frac{du_C}{dt} = -E_m \omega C \sin \omega t + 2E_m \omega_1 C \sin \omega_1 t. \quad (2.13)$$

Оскільки $\omega_1 \gg \omega$, то амплітуда вільної складової струму $2E\omega_1 C$ суттєво перевищує амплітуду вимушеного струму. Через півперіоду власних коливань, тобто при $t = \frac{T_1}{2} = \frac{\pi}{\omega_1}$ напруга досягає максимуму (рис. 2.23, б). Оскільки за цей час напруга промислової частоти не встигає істотним чином змінитися, то без урахування згасання:

$$U_{max} \approx E_m + 2E_m = 3E_m. \quad (2.14)$$

Приблизно в цей же момент сумарний струм, який в основному визначається вільною складовою, проходить через нульове значення і дуга у вимикачі може згаснути. При згасанні дуги напруга на ємності зберігається і її значення дорівнює $3E_m$.

Ще через півперіоду промислової частоти напруга джерела стане дорівнювати $-E_m$, напруга між контактами вимикача зростає до $4E_m$ і може статися ще одне повторне запалення дуги, під час якого в контурі відбуватимуться коливання з амплітудою $4E_m$. При цьому максимальна напруга на ємності досягне приблизно $5E_m$.

Якби повторні запалення дуги у вимикачі тривали необмежено довго, то відбувалося б безперервне зростання перенапруги.

Фізичний процес при **відключенні ненавантажених ліній** має той самий характер, що і при відключенні зосереджених ємностей, проте має свої особливості. У лініях надвисокої напруги великої довжини проявляється ємнісний ефект і тому напруга, що залишається на лінії після відключення, може бути більшою від амплітуди ЕРС джерела. Наприклад, після першого обриву дуги на лінії залишається заряд:

$$Q = C' \int_0^l u(l) \cos \beta(l-x) dx = \frac{C'}{\beta} u(l) \sin \beta l. \quad (2.15)$$

Цей заряд рівномірно розподіляється уздовж лінії в результаті перехідного коливального процесу, після згасання якого на лінії встановлюється потенціал:

$$U_0 = \frac{Q}{C'l} = u(l) \frac{\sin \beta l}{\beta l} = u(0) \frac{\text{tg} \beta l}{\beta l} > u(0). \quad (2.16)$$

З іншого боку, напруга на шинах після відключення лінії дуже швидко набуває значення, що дорівнює ЕРС джерела. Відновлення напруги на контактах вимикача відбувається відповідно до рис. 2.25, тобто максимум

відновної напруги (різниця між кривими 2 і 3) може бути не $2U_{\phi}$, а значно більше (крива 4).

При повторному запаленні дуги у вимикачі виникає ряд вільних складових, оскільки в цьому випадку перехідний процес аналогічний процесу АПВ лінії з ненульовою залишковою напругою. Відбувається збільшення амплітуди першої вільної складової в порівнянні з випадком простого коливального контуру, а багатократні віддзеркалення хвиль від індуктивності джерела і від розімкненого кінця лінії можуть привести до додаткового збільшення максимального значення перенапруг.

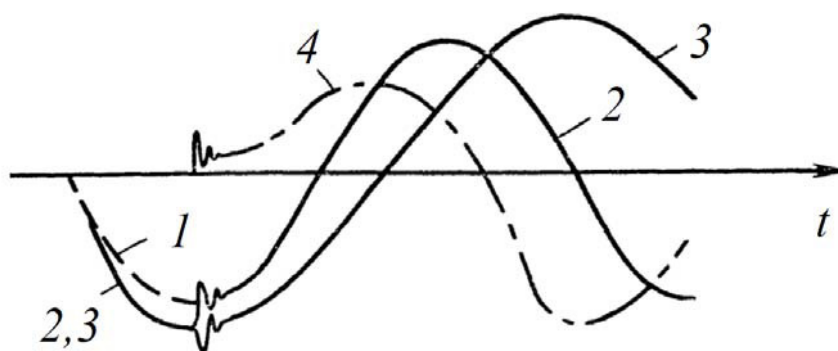


Рис. 2.25. Напруга перехідного процесу при відключенні лінії великої довжини без реакторів поперечної компенсації: 1 – ЕРС джерела; 2 – напруга на шинах; 3 – напруга на лінії; 4 – відновна напруга на вимикачі

На рис. 2.26 приведена напруга в кінці розімкненої лінії при її відключенні від джерела з внутрішньою індуктивністю з одним повторним запаленням дуги поблизу максимуму ЕРС. Навіть при одному повторному запаленні напруга в перехідному процесі досягає значення $3,8U_{\phi}$.

Якщо на лінії є *реактори*, то після обриву дуги у вимикачі починається коливальний процес розряду ємності лінії через реактор. Частота цих затухаючих коливань зазвичай менша від частоти джерела. Характер коливань ілюструє рис. 2.27. Коливальний розряд ємності лінії сприяє зменшенню відновної напруги на контактах вимикачів (різниця між кривими 2 і 3) і швидкості його наростання.

Через великі значення перенапруг, що виникають при відключенні ненавантажених ліній, які супроводжуються повторними запаленнями дуги поблизу максимуму відновної напруги, на контактах вимикачів, доцільно створювати вимикачі, що не дають повторних запалень в процесі відключення ненавантажених ліній. Останнє може бути досягнуте створенням таких дугогасительних пристроїв вимикача, які забезпечують більш швидке наростання відновної електричної міцності ніж очікувана відновна напруга на контактах вимикача.

2.3.5. Перенапруги перехідного процесу при відключенні великих струмів

При короткому замиканні на лінії напруга в місці КЗ зазвичай близька до нуля. Після відключення вимикача Q2 (рис. 2.27, а) напруга у кінці лінії збільшується до сталого значення. Оскільки відновлення напруги відбувається в результаті перехідного коливального процесу, його вільні складові, накладені на амплітуду сталої напруги, можуть привести до появи перенапруг.

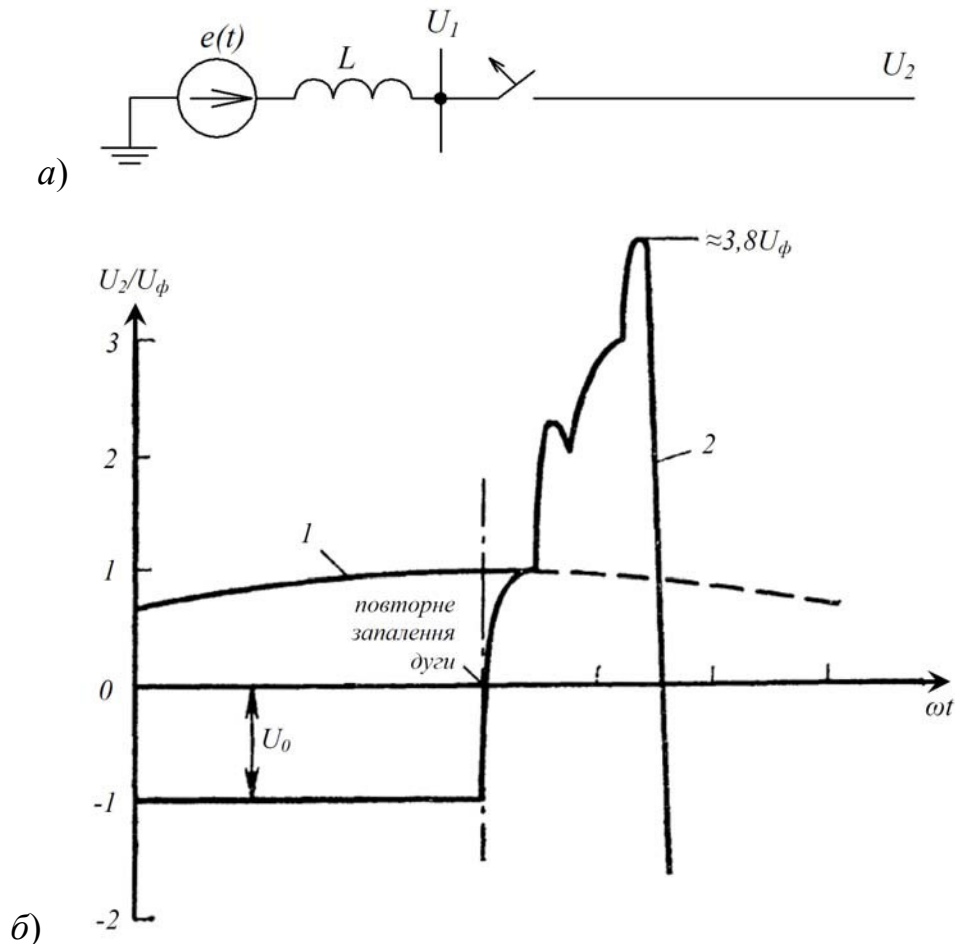


Рис. 2.26. Перехідний процес при відключенні лінії з одним повторним запаленням (U_0 – напруга залишкового заряду): а – розрахункова схема; б – криві ЕРС (1) та напруги на кінці лінії (2)

На рис. 2.27, б показано розподіл по лінії сталої напруги при КЗ і після його відключення (розімкнена лінія).

Оскільки одностороннє відключення КЗ призводить до тієї ж схеми, що і включення розімкненої лінії, ємність лінії заряджена до деякого початкового значення напруги (рис. 2.27). Ця обставина зменшує амплітуду вільних коливань при відключенні КЗ в порівнянні з режимом включення лінії.

При односторонньому відключенні КЗ амплітуда першої вільної складової у кінці лінії менша, ніж амплітуда вимушеної складової. Це означає, що ударний коефіцієнт при відключенні КЗ не може перевищувати 2.

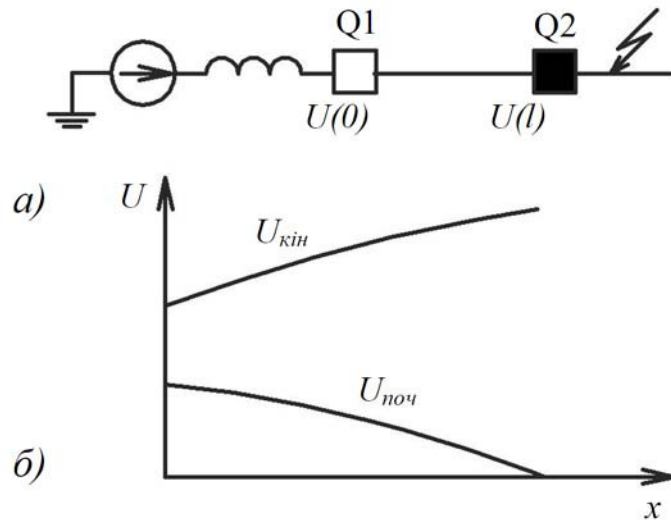


Рис. 2.27. Відключенні струму КЗ: а – схема; б – розподілення напруги до відключення ($U_{пoch}$) і після відключення ($U_{кін}$)

Якщо на лінії є пристрій поздовжньої компенсації (ППК), то проходження струму короткого замикання через ємність ППК викликає на ній значне падіння напруги (рис. 2.28). За наявності реакторів за ППК відключення КЗ призводить до коливального розряду ємності через реактор. Амплітуда субгармонійних коливань залежить від початкового заряду на ємності. За відсутності реакторів за ППК замість субгармонійних коливань на кінці лінії з'являється постійна складова напруги.

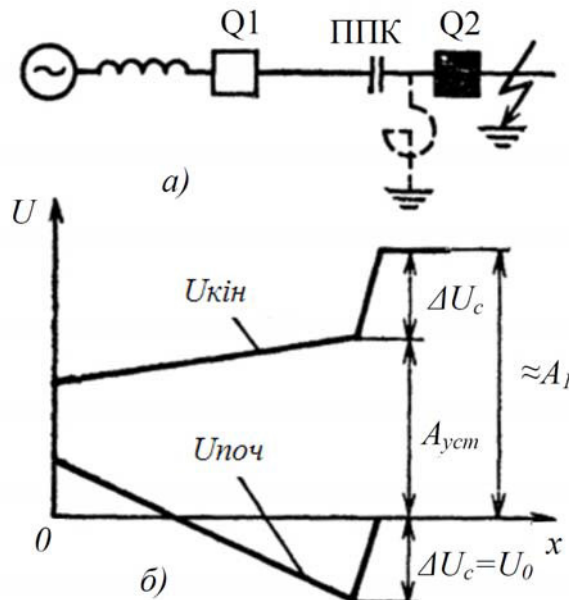


Рис. 2.28. Розподілення напруги до і після відключення КЗ за пристроєм поздовжньої компенсації (ППК): а – схема; б – розподілення напруги

Напруга, прикладена до ємності, при КЗ росте зі збільшенням ступеня компенсації і потужності джерела і залежить від місця КЗ. Вона досягає найбільшого значення при КЗ безпосередньо за ППК. Значна напруга на ємності ΔU_C призводить до появи в перехідному процесі великої постійної складової $A_0 = \Delta U_C$ або гармоніки з приблизно такою ж амплітудою.

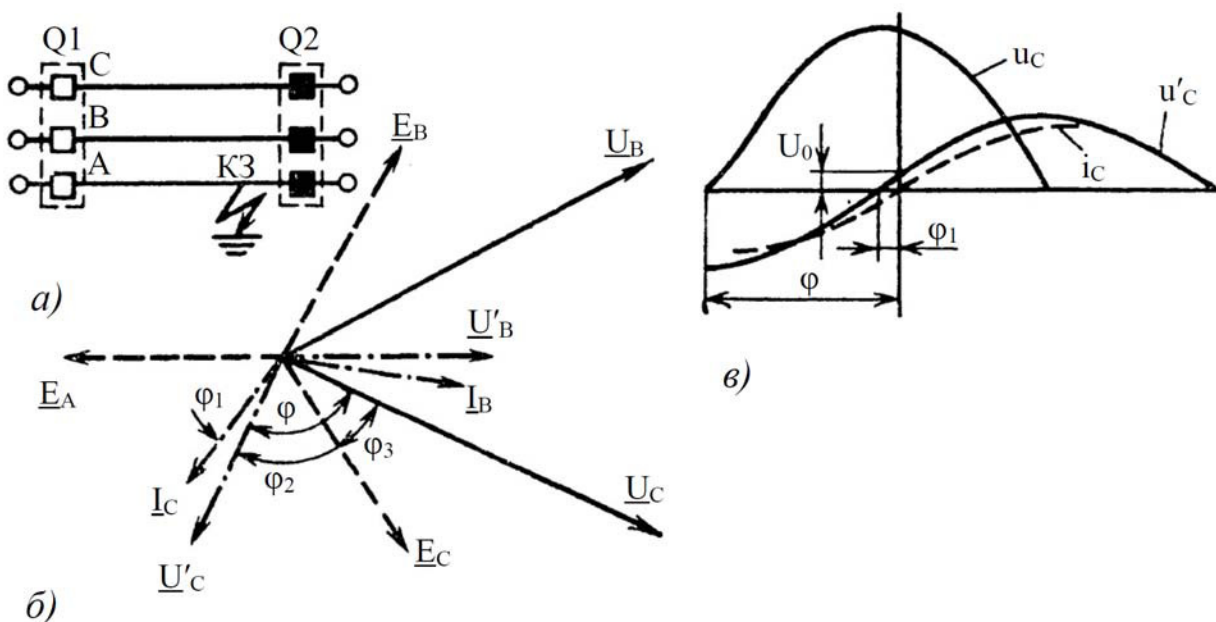


Рис. 2.29. Відключення однофазного КЗ: а – розрахункова схема; б – векторна діаграма струмів і напруг; в – криві напруги в місці КЗ до і після відключення

Розглянемо випадок відключення однофазного КЗ в трифазній лінії. Перенапруги, що виникають при цьому, обумовлені неодноразовою роботою вимикачів по кінцях лінії, через що лінія короткочасно опиняється під напругою з одного кінця (умовно прийнято, що в схемі рис. 2.29 вимикач Q1 відключається пізніше за вимикач Q2). Амплітуда напруги в перехідному процесі залежить від різниці миттєвих значень сталої напруги на неушкоджених фазах до і після відключення. Її можна приблизно оцінити за допомогою векторної діаграми рис. 2.29, б на якій: $\underline{E}_A, \underline{E}_B, \underline{E}_C$ – симетрична зірка ЕРС джерела; $\underline{U}'_B, \underline{U}'_C$ – напруги на здорових фазах до відключення вимикача Q2; φ_2 – кут, на який ця напруга відстає від відповідних векторів ЕРС. Кут φ_2 в основному визначається потужністю, що передається в нормальному режимі, і довжиною лінії. Його значення може наближатися до 60° . При КЗ у фазі А поблизу вимикача Q2 напруги на неушкоджених фазах $\underline{U}'_B, \underline{U}'_C$ мало змінюються, оскільки до відключення Q2 відношення опору нульової послідовності до опору прямої X_0/X_1 відносно місця КЗ є незначним, тобто $X_0/X_1 \leq 1$. Струми в неушкоджених фазах визначаються в основному активним навантаженням і відстають від відповідної напруги на невеликий кут φ_1 .

Після відключення Q2 складові прямої послідовності на здорових фазах співпадають по фазі з ЕРС джерела (якщо нехтувати впливом активних втрат), вектори напруги \underline{U}_B , \underline{U}_C зрушуються на кут φ_3 , який залежить від відношення X_0/X_1 .

На рис. 2.29, в показані криві струму і напруг u'_C і u_C у фазі С до і після відключення вимикача Q2. Під час переходу кривої струму через нуль відбувається відключення струму в цій фазі. Амплітуда перехідного процесу залежить від кута зрушення між напругами u'_C і u_C : $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 \approx \varphi_2 + \varphi_3$. Кут φ_2 залежить від потужності, яка передається, довжини лінії, ступеня поперечної і поздовжньої компенсації і може наближатися до 60-70°. Кут φ_3 залежить від відношення X_0/X_1 і не перевищує 30°. При цьому $\varphi = \varphi_2 + \varphi_3$ може наближатися до 90°. Але навіть в цьому випадку ударний коефіцієнт менший, ніж при включенні розімкненої лінії в максимум ЕРС. Зазвичай в даному випадку $K_{уд} = 1,4 \div 1,6$.

Незважаючи на невеликі значення ударного коефіцієнта кратність перенапруг може бути дуже великою внаслідок великого значення $A_{уст}$ через несиметрію фаз.

2.3.6. Перенапруги при відключенні малих індуктивних струмів

Прикладом відключення малих індуктивних струмів є **відключення від шин високої напруги ненавантаженого трансформатора**. При роботі вимикача відбувається так званий "зріз" струму, коли він обривається у вимикачі не при нульовому значенні, а при значенні I_0 (рис. 2.30, а), яке залежить від амплітуди I_{max} струму, що протікає через вимикач (рис. 2.30, б).

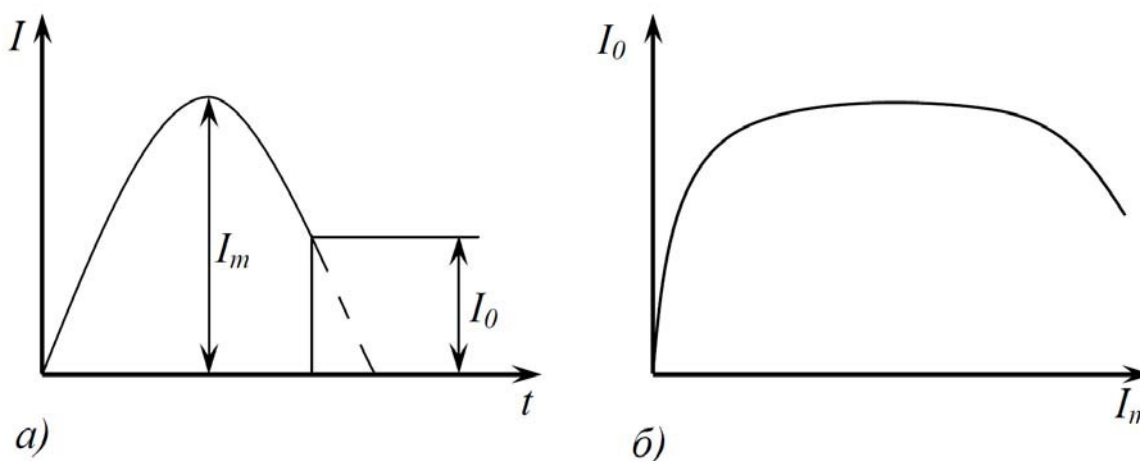


Рис. 2.30. Залежність струму зрізу від амплітуди струму через вимикач:
а – крива струму; б – залежність струму зрізу від амплітуди струму

При невеликих значеннях I_{max} обрив струму у вимикачі може статися навіть у момент максимуму протікаючого струму, тому в області дуже малих

амплітуд струм зрізу I_0 росте пропорційно I_{max} . Область насичення відповідає максимальним значенням I_0 , які визначаються конкретним типом вимикача. При дуже великих амплітудах струму, що проходить через вимикач, явище зрізу відсутнє через утворення сильно іонізованого дугового каналу.

Розглянемо зріз струму у вимикачі схеми рис. 2.31, а, яка відповідає відключенню ненавантаженого трансформатора вимикачем Q. Ємність C в схемі заміщення зазвичай включає вхідну ємність трансформатора і ємність шин до точки підключення вимикача. Індуктивність L відповідає індуктивності намагнічення трансформатора і може досягати дуже великих значень (десятків Гн).

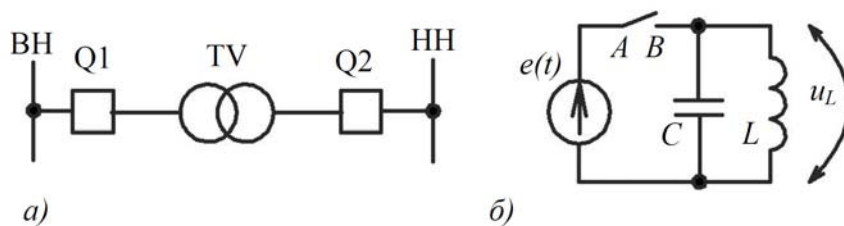


Рис. 2.31. Відключення ненавантаженого трансформатора від шин високої напруги:
а – схема заміщення; б – еквівалентна розрахункова схема

У момент обриву струму миттєве значення напруги на ємності дорівнює U_0 . У частині кола, що відключається, до цього моменту накопичена енергія $LI_0^2/2$ в магнітному полі і енергія $CU_0^2/2$ в ємності C . Якщо не враховувати загасання процесу, то в контурі LC виникають незгасаючі коливання, які описуються рівнянням:

$$u_C(t) = U_0 \cos \omega_1 t + \omega_1 L I_0 \sin \omega_1 t = U_0 \cos \omega_1 t + I_0 \sqrt{\frac{L}{C}} \sin \omega_1 t, \quad (2.17)$$

де $\omega_1 = 1/\sqrt{LC}$ – власна частота коливань контуру.

Максимальна напруга на відключеному колі становить:

$$U_{max} = \sqrt{U_0^2 + \left(I_0 \sqrt{\frac{L}{C}} \right)^2}. \quad (2.18)$$

Розрахована за (2.18) напруга може досягати дуже великих значень (це так звані "очікувані перенапруги"). Реальні значення напруги не досягають U_{max} , оскільки відбуваються повторні запалення дуги у вимикачі.

Напруга на контактах вимикача U_{ab} (рис. 2.31, б) після зрізу струму визначається різницею напруги U_C і ЕРС джерела $e(t)$. Відновна міцність міжконтактного проміжку протягом першого напівперіоду вільних коливань контуру, що відключається, який зазвичай складає менше 0,1 періоду напруги джерела, ще мала (рис. 2.24), тому повторні пробої у вимикачі неминучі.

Процес повторних пробоев у вимикачі можна спрощено проілюструвати за допомогою рис. 2.32. Перший зріз струму відбувається у момент часу t_0 ,

після чого напруга на ємності C починає зростати відповідно до рівняння (2.17). Контакти вимикача почали розходитися у момент t_n , тобто дещо раніше за зріз струму. Якби дуга згасла у момент t_n , то відновна міцність вимикача наростала б відповідно до кривої u_{np} . При зрізі струму міцність проміжку через швидке гасіння дуги також майже відразу ж зростає до значення, що визначається кривою u_{np} . Коли крива напруги на контактах вимикача U_{ab} перетинається з кривою міцності u_{np} , слідує повторний пробій.

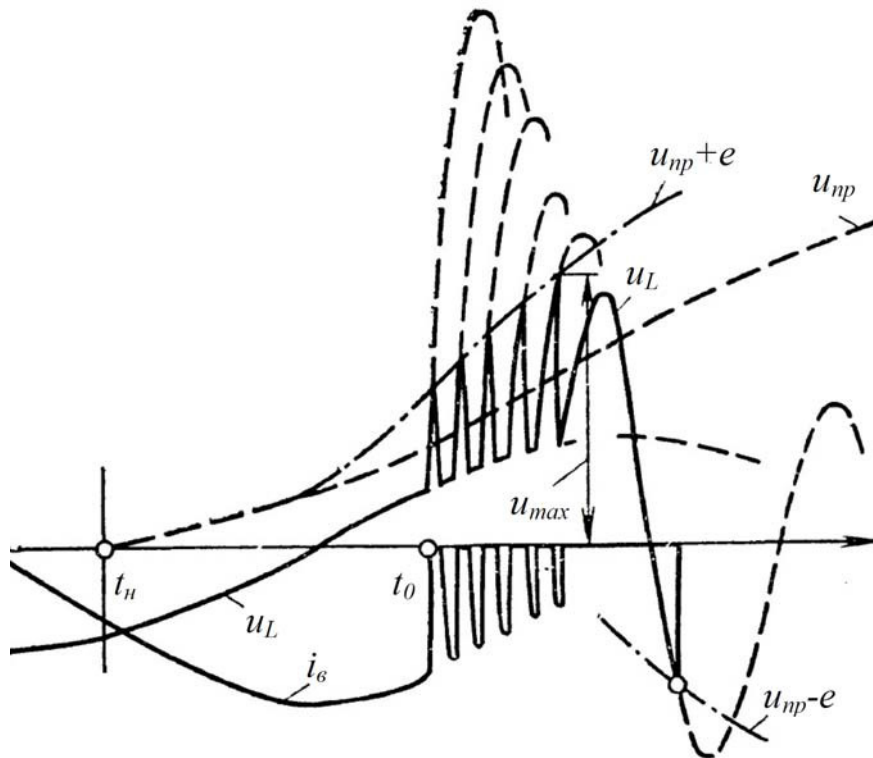


Рис. 2.32. Перехідний процес при відключенні ненавантаженого трансформатора

Після пробою напруга між контактами вимикача знижується до нуля, а напруга U_C – до значення напруги джерела. У вимикачі знову з'являється струм. Через невеликий інтервал часу відбувається новий зріз струму, але вже при меншому його значенні, ніж I_0 . Внаслідок цього і напруга на контактах виявляється меншою. Проте зазвичай вона досить велика, щоб викликати новий пробій міжконтактного проміжку, що призводить до нового запалення дуги. Процес повторюється до тих пір, поки максимальні значення напруги на контактах, що поступово зменшуються, не будуть меншими від відновної міцності міжконтактного проміжку вимикача.

У ряді випадків повторні запалення дуги у вимикачах відбуваються протягом двох і більше напівперіодів промислової частоти. Чим довше триває процес повторних запалень, тим більшими є перенапруги на індуктивності трансформатора, яка відключається, що обумовлено поступовим зростанням відновної міцності між контактами вимикача. Граничні значення перенапруг

можуть досягати $4U_\phi$ і більш, але в мережах з номінальною напругою 220 кВ і вище ефективним засобом їх обмеження є грозозахисні вентильні розрядники, що включаються на трансформаторному приєднанні між вимикачем і трансформатором.

2.3.7. Перенапруги перехідного процесу при переміжних замиканнях на землю

Більшість замикань на землю в електричних системах супроводжуються виникненням дуги. У мережі із заземленою нейтраллю струм короткого замикання на землю може бути дуже великим і становити небезпеку для електроустаткування, тому релейний захист відключає вимикач. У мережі з ізольованою нейтраллю або нейтраллю, заземленою через дугогасний реактор, струм замикання не представляє небезпеки для елементів електроустаткування і тому може відразу не відключатися. Дуга, що при цьому виникає, може існувати відносно довго.

При ізольованій нейтралі через місце замикання на землю проходить ємнісний струм, що дорівнює $3\omega C_\phi U_\phi$. В невеликих мережах 6-35 кВ струм однофазного замикання на землю має значення декількох ампер. Наявність замикання на землю практично не позначається на умовах передачі енергії споживачам. Трикутник лінійної напруги залишається неспотвореним, а підвищення напруги промислової частоти на неушкоджених фазах відносно землі до лінійного не представляє небезпеки для ізоляції, оскільки її рівень значно вищий.

При малих струмах замикання спостерігається швидке самозгасання дуги. Чинником, що сприяє гасінню відкритої дуги в повітрі, є її подовження під дією динамічних зусиль і потоків повітря. Гасіння закритих дуг (наприклад, в кабелях) обумовлене виникненням ударних тисків через випаровування і розкладання просочувальної маси і виділення деіонізованих газів.

Збільшення протяжності ліній приводить до збільшення ємнісного струму до десятків і сотень ампер, що ускладнює деіонізацію дуги і збільшує тривалість її горіння. Навіть включення дугогасного реактора не заважає процесу бути нестійким: остаточному згасанню дуги передують декілька "спроб гасіння" під час переходу струму через нульове значення з наступним повторним запаленням дуги під дією відновної напруги на дуговому проміжку. Така переміжна дуга призводить до появи коливань, що виникають при кожному обриві струму і його запаленні. Перехідний процес часто супроводжується появою перенапруг, які мають багато спільного з перенапругами при відключенні ненавантажених ліній.

Розглянемо перехідні процеси при виникненні **однофазного короткого замикання на землю в мережі з ізольованою нейтраллю**, схема заміщення якої приведена на рис. 2.33. Оскільки розглядаються короткі лінії, їх власну індуктивність можна не враховувати, а ємності вважати зосередженими в одній точці.

На рис. 2.34 наведені криві зміни напруг відносно землі фази А, в якій відбувається замикання на землю у момент t_1 , і неушкодженої фази С, а також крива зміни міжфазної напруги $u_{CA} = u_C - u_A$. В сталому після замикання на землю режимі напруга відносно землі фази С дорівнює міжфазній напрузі u_{CA} , але цьому передуює перехідний процес, який можна розбити на два етапи.

Безпосередньо після замикання на землю фази А ємність відносно землі неушкодженої фази $C'_0 l$, що заряджена до напруги $u_C(t_1)$, з'єднується паралельно міжфазній ємності $C'_{mf} l$, що знаходилася під напругою $u_{CA}(t_1)$. Напруги на двох паралельно з'єднаних ємностях практично миттєво зрівнюються і набувають однакового значення u_{noc} .

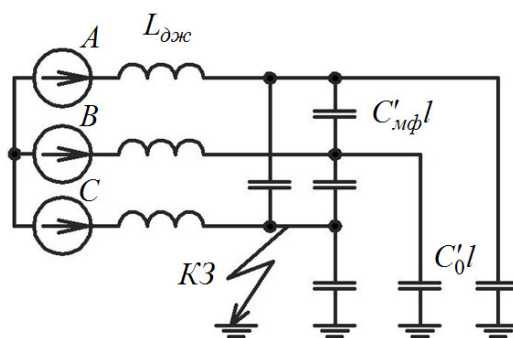


Рис. 2.33. Схема заміщення мережі з ізолюованою нейтраллю: C'_0 – ємність фази на землю; C'_{mf} – міжфазна ємність; $L_{0ж}$ – індуктивність джерела

У фазі В процес відбувається аналогічно фазі С. Таким чином, безпосередньо після замикання на землю напруга на неушкоджених фазах змінюється стрибкоподібно. Далі починається другий етап перехідного процесу – перезаряд ємностей $C'_0 l$ і $C'_{mf} l$ неушкоджених фаз через індуктивність джерела, тобто вільні коливання навколо вимушеної напруги u_{CA} або u_{BA} .

Напруга на неушкоджених фазах досягає свого максимального значення через півперіоду вільних коливань, тобто при $t_2 = T_1 / 2 = \pi / \omega_1$ (рис. 2.34, б). Оскільки зазвичай $\omega_1 \gg \omega$, то напруги u_{BA} та u_{CA} за цей час практично не змінюються, зберігаючи свої значення, які вони мали у момент замикання: $u_{CA}(t_1) = u_{BA}(t_1)$. Наприклад, якщо $u_A(t_1) = -U_\phi$, $u_C(t_1) = 0,5U_\phi$, то $U_{Cmax} = 2,22U_\phi$. Максимальна напруга у фазі В має практично таке ж значення.

З моменту замикання на землю в каналі дуги проходить струм, який складається з вимушеної складової $3\omega C'_0 l U_\phi \sin \omega t$ та вільної височастотної складової $2\omega_1 (C'_0 + C'_{mf}) l U_\phi \sin \omega_1 t$. Оскільки $\omega_1 \gg \omega$, то амплітуда вільної складової струму набагато більше вимушеної і сумарний струм проходить через нуль у момент t_2 максимуму перехідної напруги на неушкоджених фазах (рис. 2.34, в). При цьому може статися гасіння дуги і відновиться електрична міцність дугового проміжку.

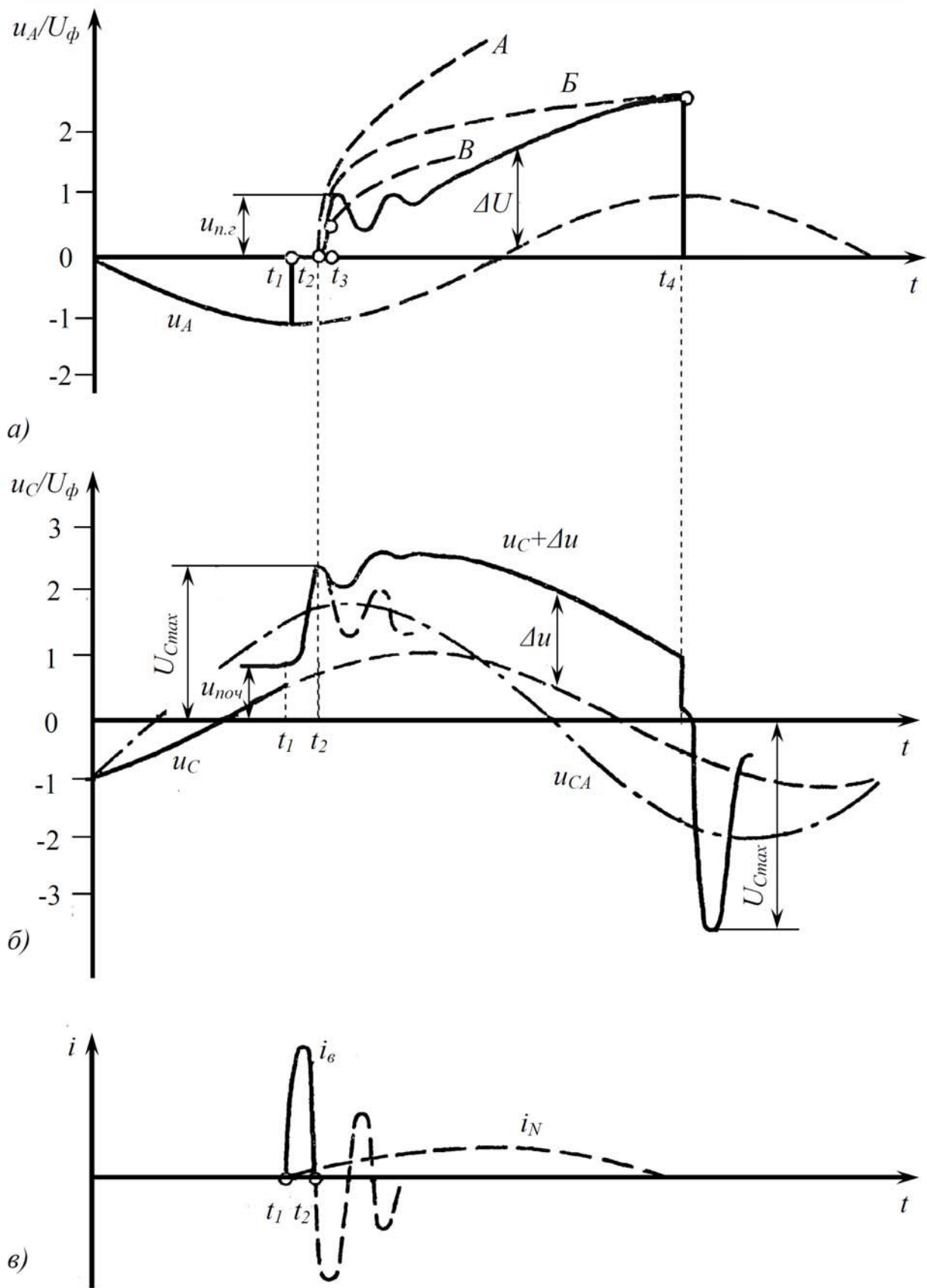


Рис. 2.34. Напряга переходного процесу при дуговому КЗ:
 a – напруга фази А; $б$ – напруга фази С; $в$ – струм в місці замикання

Як показують експериментальні дослідження, якщо паралельно дуговому проміжку включена ємність (у нашому випадку – ємність пошкодженої фази $C_A = C_0' l$), спроба гасіння дуги відбувається при кожному переході струму через нуль. Успіх гасіння залежить від співвідношення між швидкостями відновлення електричної міцності дугового проміжку і напруги на ньому.

Якщо дуга в пошкодженій фазі гасне при першому переході струму через нуль, то на ємностях неушкоджених фаз зберігаються заряди, а на ємності пошкодженої фази у момент обриву дуги заряд дорівнює нулю. Після гасіння дуги сумарний заряд розподіляється порівну між ємностями трьох фаз, які набувають однакову додаткову напругу відносно землі Δu (зміщення нейтралі), що накладається на напругу джерела.

Після гасіння дуги виникає новий перехідний процес, коли на сталу напругу $u_A + \Delta u$ накладаються високочастотні коливання (рис. 2.34, а, б) з частотою $\omega_2 \gg \omega$, яка визначається параметрами схеми прямої послідовності внаслідок відновлення симетричної схеми.

При коливаннях напруга на фазі А досягає свого першого високочастотного максимуму, що дістав назву піку гасіння $u_{n.г}$.

Після згасання вільних коливань відбувається плавний підйом напруги з частотою ω джерела.

На рис. 2.34, а разом зі зміною напруги на дуговому проміжку приведені також криві відновної міцності для різних випадків А, Б, В. Хід кривої відновлюваної електричної міцності залежить від великого числа чинників, що важко враховуються, зокрема максимального значення струму в дузі, яке визначає міру іонізації дугового каналу, умов горіння самої дуги (у відкритому просторі або закритому тощо).

Випадок А, коли міцність проміжку наростає швидше, ніж напруга на проміжку, зустрічається в невеликих мережах з малою ємністю відносно землі, в яких дугове замикання на землю зазвичай ліквідується протягом одного напівперіоду промислової частоти.

У випадку Б крива відновної міцності проходить вище за пік гасіння, але перетинається з кривою відновної напруги поблизу її максимуму (t_4). У цей момент дуга знову спалахує, але може знову згаснути під час переходу через нуль високочастотного струму. Дуга набуває переміжного характеру.

У випадку В повторне запалення дуги відбувається у момент t_3 незабаром після її згасання і супроводжується коливальним процесом, але вже з меншою амплітудою. Імовірність гасіння дуги при другому проходженні струму через нуль більше, ніж при першому, а зміщення нейтралі, що має місце при цьому, менше. Якщо ж дуга спалахне знову і не згасне під час переходу через нуль струму високочастотних коливань, то питання про те, чи буде вона горіти далі, визначається під час переходу через нуль струму промислової частоти. Отже, дуга може бути як переміжною, так і стійкою. У останньому випадку дугове замикання на землю не призводить до перенапруг, за винятком першого короткочасного сплеску напруги. Такі дуги небезпечні великою тривалістю

горіння і можливістю безповоротного ушкодження ізоляції (закриті дуги) або перекиданням на інші фази (відкриті дуги).

Максимальні перенапруги виникають у випадку Б, коли повторне запалення дуги відбувається приблизно через півперіоду промислової частоти після гасіння дуги. Збільшення амплітуди вільних коливань обумовлене зміщенням нейтралі Δu . На рис. 2.34, а, б показано, як змінюється напруга у фазах А і С з урахуванням постійної складової Δu , і видно зростання різниці між сталою напругою u_{AC} і напругою нешкодженної фази $u_C + \Delta u$ в момент, що передує повторному запаленню дуги, що і призводить до збільшення амплітуди вільних коливань.

2.3.8. Обмеження комутаційних перенапруг

2.3.8.1. Основні принципи побудови захисту від комутаційних перенапруг

З попереднього матеріалу випливає, що комутаційні перенапруги можуть досягати $(3 \div 3,5)U_\phi$. Небезпека комутаційних перенапруг полягає в тому, що їх значення в більшості випадків перевершують рівні ізоляції електроустановок 330 і 500 кВ ($2,7U_\phi$ та $2,5U_\phi$), а тим більше установок 750 кВ ($2,1U_\phi$) і 1150 кВ ($1,8U_\phi$). Примусове обмеження комутаційних перенапруг є відмінною рисою електропередач надвисокої напруги, хоча деякі із захисних заходів, що там використовуються, застосовуються і в електроустановках з напругою 220 кВ і нижче.

Захист від комутаційних перенапруг заснований на наступних *принципах*:

- обмеження числа режимів, в яких можуть виникати небезпечні перенапруги, за допомогою схемних заходів;
- обмеження амплітуд сталих перенапруг, що приводить також і до зниження перенапруг перехідного процесу;
- обмеження амплітуд комутаційних перенапруг за допомогою вентильних розрядників або вбудованих у вимикачі шунтувальних опорів.

Менші значення перенапруг можуть бути досягнуті підбором сприятливих початкових значень перехідного процесу, при яких амплітуди вільних коливань мають мінімальні значення (наприклад, прискорення стікання заряду з лінії під час паузи АПВ або управління моментом включення вимикача, програмоване управління роботою вимикачів).

До схемних заходів, що сприяють зниженню амплітуд комутаційних перенапруг, слід віднести встановлення при включенні лінії знижених коефіцієнтів трансформації силових трансформаторів, підключення лінії спочатку до потужніших шин, попереднє, до комутації лінії, підключення реакторів поперечної компенсації на вищій і середній (або третинній) напрузі.

Сприятливий ефект завчасного підключення реакторів поперечної компенсації до лінії, так само як і встановлення знижених коефіцієнтів трансформації і мінімальних ЕРС, може бути використано тільки при плановому включенні лінії або в режимі електропередачі, коли усі реактори включені відповідно до балансу реактивної потужності. При передачі

максимальної потужності включення усіх реакторів в проміжних точках лінії електропередачі без поздовжньої компенсації ємності неприпустимо, оскільки це призводить до зростання втрат і зниження межі стійкості. Крім того, потужність реакторів, необхідна по режиму передачі активної потужності, може виявитися недостатньою для обмеження сталих перенапруг при несиметричних КЗ. Тому дуже часто застосовується схема "безінерційного підключення реакторів": при виникненні несиметричних КЗ для обмеження сталих перенапруг, і в деякій мірі комутаційних, відбувається підключення реакторів через іскровий проміжок.

Обмеження амплітуд комутаційних перенапруг здійснюється або за рахунок розсіювання енергії вільних коливань в нелінійних опорах вентильних розрядників, включених між фазним дротом і землею, або за допомогою опорів, що вбудовані у вимикач і підключаються короткочасно послідовно з лінією на час, достатній для необхідного демпфування вільних коливань. Останнє реалізоване у вимикачах двоступінчатої дії з шунтувальними опорами.

Досвід експлуатації показує, що в електроустановках з номінальною напругою до 220 кВ включно обмеженню підлягають перенапруги, що виникають при відключенні ненавантажених трансформаторів, у ряді випадків при відключенні ненавантажених ліній і при АПВ. Оскільки рівень ізоляції цих електроустановок в основному визначається грозовими перенапругами, то інші види комутаційних перенапруг не становлять небезпеки для ізоляції.

Комутаційні перенапруги при відключенні ненавантажених трансформаторів мають високу амплітуду, але невелику тривалість. Захист від цих перенапруг здійснюється грозозахисними розрядниками, пропускна здатність яких достатня для того, щоб розсіяти енергію вільних коливань напруги. Обмеження таких перенапруг можна здійснити також шляхом використання вимикачів з шунтувальними опорами.

Обмеження перенапруг при відключенні ненавантажених ліній вимикачами, що дають повторні запалення дуги, представляє дуже складне технічне завдання. Обмеження цих перенапруг грозозахисними розрядниками неможливе з двох причин: по-перше, за умовами блискавкозахисту ці розрядники мають бути включені на підстанції, а не на лінії, а по-друге, енергія таких перенапруг перевершує пропускну здатність грозозахисних розрядників. В принципі такі перенапруги можуть бути обмежені спеціальними комутаційними вентильними розрядниками. Проте було виявлено, що захист від перенапруг при відключенні ненавантажених ліній може виконуватися і іншими засобами – винесенням електромагнітних трансформаторів напруги на лінію, застосуванням вимикачів з шунтувальними резисторами.

2.3.8.2. Класифікація заходів захисту

Класифікація заходів захисту від перенапруг може бути здійснена принаймні за двома ознаками. Перший спосіб класифікації є наступним:

Заходи, пов'язані з керуванням комутаціями:

- кероване включення та відключенні
- програмовані комутації.

Апаратні заходи:

- обмеження перенапруг;
- резистори у вимикачах;
- шунтувальні резистори.

Другий спосіб класифікації пов'язаний із загальним виразом, що характеризує рівень перенапруг:

$$K_{y\partial} = U_{max} / A_{уст} . \quad (2.19)$$

Класифікація, заснована на виразі (2.19), пов'язана з впливом тих або інших заходів на $K_{y\partial}$, тобто тих заходів, що впливають на затухання перехідних процесів, що супроводжують комутацію, або на значення $A_{уст}$, тобто на зміну схеми. Заходи, що впливають на $A_{уст}$: шунтувальні реактори; програмовані комутації. Заходи, що впливають на $K_{y\partial}$: обмеження перенапруг; резистори у вимикачах; керовані комутації.

Шунтувальні реактори встановлюються на лінії, виходячи з вимоги забезпечення допустимого рівня напруги на повітряній лінії в мінімальному експлуатаційному режимі. Встановлення додаткових реакторів для обмеження комутаційних перенапруг навряд чи можна вважати економічно виправданою мірою захисту.

Слід також визнати, що по можливості за допомогою тих або інших заходів захисту слід передусім впливати на причину виникнення перенапруг. При такому підході спеціальний апарат для обмеження перенапруг типу ОПН слід використовувати як додаткову міру захист, оскільки цей апарат лише обмежує перенапруги, що виникли за несприятливих умов здійснення комутації.

Тому розглянемо спочатку заходи, засновані на використанні тих засобів, які полегшують умови здійснення комутації і тим самим призводять до обмеження перенапруг. До таких заходів можна віднести кероване і програмоване включення, а також оснащення вимикачів додатковими резисторами.

2.3.8.3. Кероване ввімкнення повітряної лінії

При аналізі максимально можливих перенапруг, що виникають при плановому включенні лінії, найбільш несприятливий випадок відповідає включенню в момент, коли напруга на контактах є максимальною. До найменших перенапруг приведе включення в момент, коли напруга на контактах вимикача дорівнює нулю.

В разі керуванням моментом ввімкнення вимикача можна обмежити перенапруги в 1,33 рази. Для цього необхідно забезпечити знаходження значення кута ввімкнення від 0 до 20°. Очевидно, що для здійснення такої точності включення (1 мс) необхідно мати дуже малий розкиду часу спрацювання приводу вимикача при його включенні. На сьогоднішній день ця умова для існуючих конструкцій вимикачів (повітрі і елегазові) є нездійсненною.

2.3.8.4. Програмоване ввімкнення лінії

У разі, якщо повітряна лінія зв'язує дві системи різної потужності, або у разі, якщо шунтувальний реактор встановлено лише на одному кінці повітряної лінії, може виявитися досить ефективним програмоване включення, тобто включення лінії в першу чергу зі сторони, що відповідає мінімуму вимушеної складової на іншому кінці лінії. Так, наприклад, в схемі без шунтувальних реакторів (рис. 2.35, а) при $x_1 < x_2$ в першу чергу має включитися вимикач В1. У схемі, в якій лінія зв'язує системи однакової потужності ($x_1 = x_2 = x$, рис. 2.35, б), але при встановленні шунтувального реактора лише з боку системи 2, включення в першу чергу також слід здійснювати з боку системи 1.

Цей захід застосовується нині, зокрема, в ЛЕП 500 кВ, оскільки не вимагає управління процесом в реальному часі.

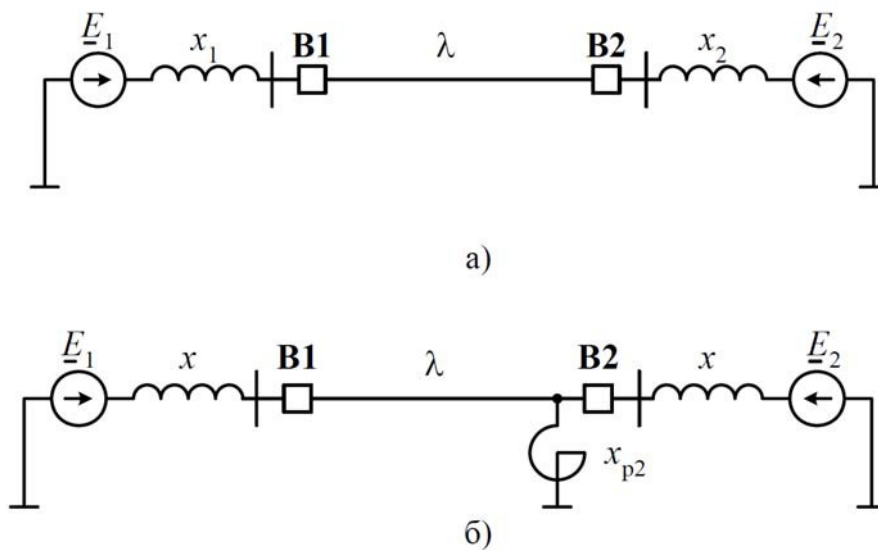


Рис. 2.35. До пояснення програмованого ввімкнення лінії

2.3.8.5. Застосування резисторів у вимикачах

Обмеження перенапруг може бути здійснено шляхом внесення до схеми додаткового згасання, наприклад, при здійсненні комутації включення вимикачем з додатковим резистором. Такий вимикач має два дугогасильні пристрої (рис. 2.36), що відповідають головними контактами (ГК) і допоміжним контактам (ДК).

Ввімкнення вимикача здійснюється в два етапи:

- І етап – включення допоміжних контактів ДК, що вводять в лінію, яка включається, додатковий опір R ;
- ІІ етап – замикання головних контактів ГК, що шунтують резистор і тим самим здійснюють остаточне одностороннє включення лінії.

Час між включенням допоміжних і головних контактів складає приблизно 1,5..2 періоди промислової частоти. За цей час перехідні процеси, пов'язані з включенням допоміжних контактів, практично затухають і замикання головних контактів здійснюється практично в квазістаціонарному режимі односторонньо ввімкненою лінією через резистор.

Вимоги до величини резистора повинні формуватися на основі спільного розгляду першого і другого етапів включення. Вплив величини опору резистора на максимуми перенапруг, що виникають в обох етапах ввімкнення, проілюстровано на рис. 2.37. Протягом першого етапу включення при $R=0$ максимум перенапруг співпадає з максимумом необмежених перенапруг. Із збільшенням величини опору цей максимум зменшується, наближаючись до нуля при $R \rightarrow \infty$. Під час другого етапу, навпаки, при $R=0$ не виникає ніякого перехідного процесу і напруга на лінії дорівнює напрузі в квазістаціонарному режимі односторонньо ввімкненої лінії. При збільшенні опору максимум перенапруг збільшується і при $R \rightarrow \infty$ дорівнює максимуму необмежених перенапруг.

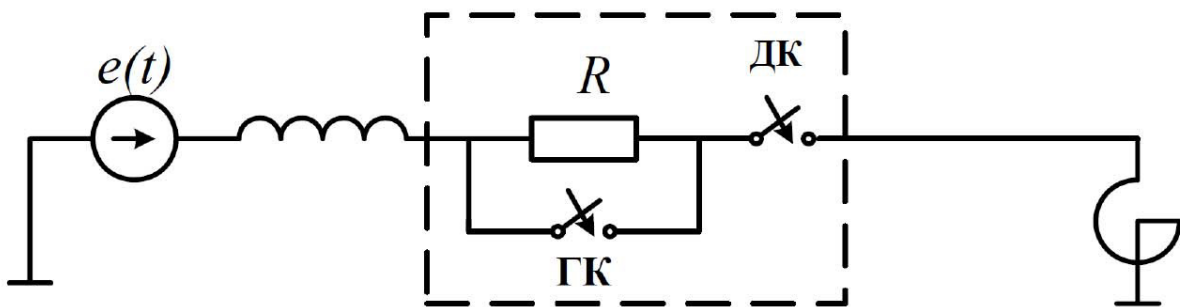


Рис. 2.36. Принципова схема вимикача з додатковим резистором

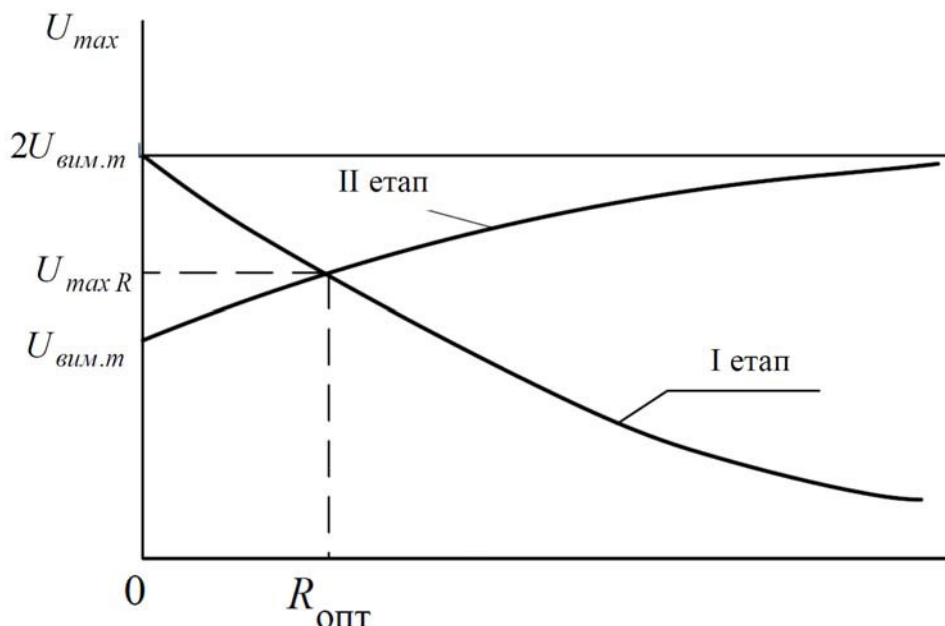


Рис. 2.37. Вплив величини опору резистора на рівні перенапруг при I і II етапах ввімкнення вимикача

Оптимальна величина опору резистора близька до хвильового опору повітряної лінії (при нескінченній потужності джерела ввімкнення лінії через опір, що дорівнює хвильовому, практично ліквідує перехідний процес,

оскільки коефіцієнт віддзеркалення від опору буде дорівнювати нулю). Зменшити перенапруги, що виникають під час другого етапу включення можна, якщо шунтувати опір у момент переходу струму в ньому через нульове значення. Проте, цей захід вимагає дуже малого розкиду в часі дії допоміжних контактів, що при існуючих конструкціях високовольтних вимикачів практично недосяжно. У схемі з шунтувальним реактором при ступені компенсації ємнісного струму близькому до одиниці, перенапруги на другому етапі виявляються істотно меншими, ніж в схемах без шунтувальних реакторів. Це пов'язано з істотно меншим струмом, що протікає через резистор i , отже, зі зменшенням перенапруг при шунтуванні опору. Ця обставина дозволяє в таких схемах вибрати велику величину опору (до $2Z_{x\phi}$). Збільшення ж величини опору дозволяє полегшити вимоги до термічної стійкості опору. Енергія, що поглинається резистором, зазвичай визначається в найбільш несприятливому випадку включення лінії на коротке замикання на початку лінії. В цьому випадку через опір протікає досить великий струм, що обмежується лише внутрішнім індуктивним опором джерела і активним опором самого резистора.

2.3.8.6. Нелінійні обмежувачі для захисту від перенапруг

Ці захисні апарати не можна використовувати в резонансних схемах при тривалих діях підвищеної напруги. Обмежувачі перенапруг нелінійні (ОПН) забезпечують зниження короточасних небезпечних для ізоляції електроустаткування імпульсів перенапруг. ОПН – безіскрові апарати, що приєднуються до повітряної лінії наглухо. Таке приєднання, на відміну від розрядників з іскровим приєднанням до лінії, виявилось можливим після синтезу полікристалічної речовини на основі окислу цинку. Оксидно-цинкові варистори мають в області струмів, характерних для комутаційних перенапруг (сотні ампер), істотно більшу нелінійність, ніж варистори на основі карборунда, що використалися в розрядниках. При номінальній напрузі через ОПН протікають струми у долі міліампер, що і дозволяє здійснювати безіскрове приєднання апаратів до струмопровідних частин електроустаткування, що захищається.

Основними характеристиками ОПН є:

- рівень обмеження перенапруг, що визначається вольт-амперною характеристикою (ВАХ) апарату;
- напруга, яку апарат може витримувати без порушення теплової стійкості протягом усього терміну експлуатації (U_C), чим вище значення U_C , тим менше захисний рівень апарату, тобто тим вища залишкова напруга на апараті при протіканні номінального струму;
- питома енергоемність апарату $W_{num} = W/U_C$ (кДж/кВ), де W – енергія що поглинається апаратом під час здійснення одиничної комутації.

2.3.9. Питання для самоперевірки

1. Провести критичний аналіз причин виникнення, характеру протікання та наслідків комутаційних перенапруг в електричних мережах.

2. Охарактеризувати перенапруги перехідного процесу при ввімкненні розімкненої лінії.

3. Які причини виникнення та наслідки перенапруг перехідного процесу при автоматичному повторному ввімкненні?

4. Чому можуть виникати перенапруги перехідного процесу при відключенні ненавантажених ліній?

5. Чи можуть виникати перенапруги при відключенні конденсаторних батарей? Пояснити причини.

6. Розкрити фізичну картину виникнення перенапруг перехідного процесу при відключенні струмів короткого замикання.

7. У чому полягає явище "зрізу" струму при відключенні від шин високої напруги ненавантаженого трансформатора.

8. Пояснити механізм виникнення повторних пробойів у вимикачі при відключенні струму холостого ходу трансформатора?

9. Проаналізувати перехідні процеси при виникненні однофазного короткого замикання на землю в мережі з ізольованою нейтраллю.

10. Провести критичний аналіз способів обмеження комутаційних перенапруг.

11. Як класифікуються заходи захисту від комутаційних перенапруг?

12. В чому полягає принцип обмеження перенапруг вимикачем з додатковим резистором?

2.4. Квазістаціонарні перенапруги

Підвищення напруги в кінці розімкненої лінії. Усталені перенапруги при однофазних коротких замиканнях. Перенапруги промислової частоти при неповнофазних режимах роботи. Ферорезонансні перенапруги.

2.4.1. Підвищення напруги в кінці розімкненої лінії

В режимі синхронізації або раптового скидання навантаження до джерела синусоїдної ЕРС виявляється підключена розімкнена лінія (рис. 2.38).

Оскільки струм у кінці лінії $\underline{I}(0) = 0$, та напруга і струм на початку лінії пов'язані з напругою у кінці наступними співвідношеннями:

$$\underline{U}(0) = \underline{U}(l) \cdot ch(\underline{\gamma}l), \quad (2.20)$$

$$\underline{I}(0) = \frac{\underline{U}(l)}{\underline{Z}_c} sh(\underline{\gamma}l), \quad (2.21)$$

де $\underline{\gamma}$ – стала розповсюдження (комплексна величина); \underline{Z}_c – хвильовий опір лінії; $\underline{U}(0)$ – комплекс напруги на початку лінії; $\underline{U}(l)$ – комплекс напруги в кінці розімкненої лінії.

Якщо коронування проводів не враховується, то:

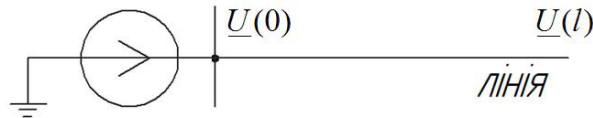
$$\underline{\gamma} = \sqrt{(R' + j\omega L') \cdot j\omega C'} = j\omega \sqrt{L' C'} \sqrt{1 + \frac{R'}{j\omega L'}}, \quad (2.22)$$

де $\omega=314$ 1/с – частота джерела; R' , L' , C' – питомі значення активного опору, індуктивності та ємності лінії (найчастіше – на 1 км).

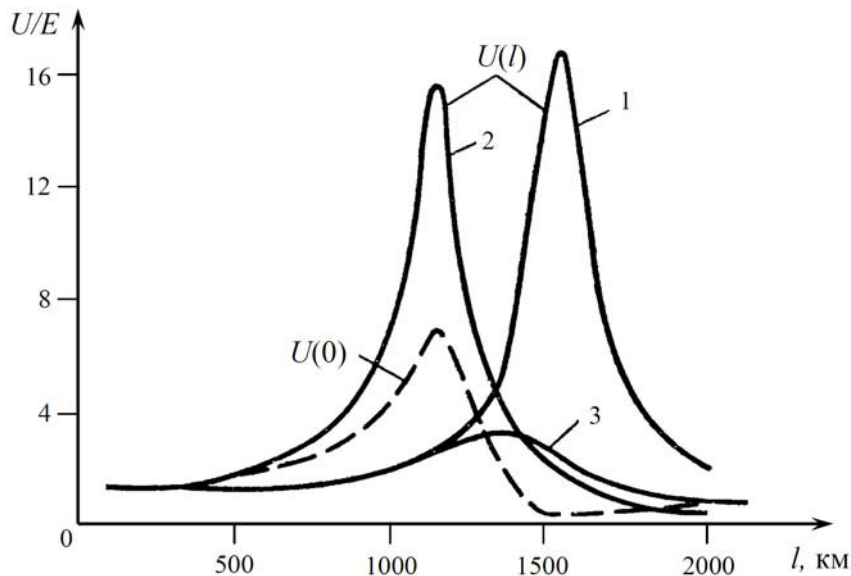
Останній вираз можна спростити, якщо врахувати, що для повітряних ліній електропередачі $R' \ll j\omega L'$:

$$\underline{\gamma} = j\omega\sqrt{L'C'} \sqrt{1 + \frac{R'}{j\omega L'}} = \frac{R'}{2\sqrt{L'/C'}} + j\omega\sqrt{L'C'} = \alpha + j\beta, \quad (2.23)$$

де α – коефіцієнт затухання; $\beta = \omega/c = 1,05 \cdot 10^{-3}$ рад/км – коефіцієнт зміни фази; c – швидкість світла.



а)



б)

Рис. 2.38. Підключення розімкненої лінії до джерела синусоїдної ЕРС: а – схема; б – резонансні криві: 1 – $X_d=0$; 2 – $X_d = 0,5Z_c$, добротність лінії та джерела $Q=12,5$; 3 – $X_d=0$, враховано коронування проводів

Хвильовий опір лінії визначається згідно із залежністю:

$$\underline{Z}_c = \sqrt{\frac{(R' + j\omega L')}{j\omega C'}} \approx Z_c \left(1 - j \frac{\alpha}{\beta} \right). \quad (2.24)$$

Відношення напруги в кінці лінії до напруги на початку лінії називається коефіцієнтом передачі:

$$\underline{K} = \frac{\underline{U}(l)}{\underline{U}(0)} = \frac{1}{\text{ch}(l \cdot \underline{\gamma})} = \frac{1}{\text{ch}(l \cdot \sqrt{(r_0 + jx_0) \cdot jb_0})}. \quad (2.25)$$

На основі (2.25) побудована залежність $U(l)$ від l (рис. 2.38, крива 1) з урахуванням того, що $U(0) = E$. Крива чітко виявляє резонансні властивості схеми. Резонанс настає при $\beta l = \pi / 2$, тобто при $l = 1500$ км, якщо $f = 50$ Гц. Лінія такої довжини має період власних коливань:

$$T_1 = \frac{2\pi}{\omega_1} = \frac{4l}{c} = 4l\sqrt{L'C'} = \frac{4\beta l}{\omega} = \frac{2\pi}{\omega}. \quad (2.26)$$

Напруга у кінці лінії при резонансі становить:

$$\underline{U}(l) = \frac{\underline{U}(0)}{\frac{\pi}{2} \frac{\alpha}{\beta}} = \frac{4}{\pi} Q \underline{U}(0), \quad (2.27)$$

де Q – добротність лінії.

Якщо джерело має внутрішній опір X_∂ , то напруга на початку лінії визначається за формулою:

$$\underline{U}(0) = \underline{E} \frac{X_{ex}}{X_{ex} - X_\partial}, \quad (2.28)$$

де X_{ex} – вхідний опір лінії, який носить ємнісний характер.

На рис. 2.38, б побудовані залежності $U(0)$ і $U(l)$ від l при $X_\partial = 0,5Z_c$ (крива 2). Напруга в точці резонансу обрахована з урахуванням добротності лінії і джерела. Точка резонансу зрушена по відношенню до відповідної точки при $X_\partial = 0$ у бік менших довжин, оскільки до індуктивності лінії додається індуктивність джерела. Аналогічні резонансні криві можуть бути побудовані при постійній довжині лінії і змінній індуктивності джерела, що відповідає, наприклад, зміні числа включених генераторів на станції. Приведені криві і рівняння показують, що в розімкненій лінії великої довжини, яка приєднана до джерела з внутрішнім опором X_∂ , можливі підвищення напруги через проходження ємнісного струму лінії через індуктивність джерела [$U(0) > E$] і індуктивність лінії [$U(l) > U(0)$]. Цей ефект, який називається **ємнісним ефектом**, особливо проявляється в лініях надвисокої напруги великої довжини. Резонанс є окремим випадком ємнісного ефекту. Він настає при $X_{ex} = X_\partial$, тобто у тому випадку, коли вхідний опір лінії, що носить ємнісний характер, дорівнює індуктивному опору джерела. Такий випадок відповідає тотожності першої частоти власних коливань схеми частоті джерела.

Розглянемо вплив реакторів на підвищення напруги в кінці розімкненої лінії. Розімкнена лінія є джерелом реактивної потужності. Ємнісний струм на початку лінії може проходити через обмотки генератора станції, що небажано, оскільки робота генераторів в режимі споживання реактивної потужності стає менш стійкою. Тому на шинах високої напруги станції і відправної системи включається реактор поперечної компенсації; реактор у шин приймальної системи, як правило, за умовами нормального режиму не потрібний. У розімкнених лініях відносно невеликої довжини (до 300-400 км), коли перепад напруги уздовж лінії невеликий, можна обмежитися включенням реактора на шинах станції. У електропередачах великої довжини на початку лінії

зосереджується 20-40 % усіх встановлених потужностей реакторів. Інші реактори встановлюються в одній або декількох точках лінії на пунктах перемикачів або підстанціях, причому в режимі повних навантажень ці реактори повністю або частково відключаються.

Розглянемо роль реакторів в режимі односторонньо включеної лінії, який може виникнути як внаслідок аварійного розриву, так і при плановому включенні лінії, зокрема в режимі синхронізації. Різниця між післяаварійним режимом і режимом синхронізації полягає в тому, що останній відбувається в заздалегідь підготовлених умовах, що забезпечують оптимальний режим напруги (зменшення збудження генераторів, встановлення мінімальних коефіцієнтів трансформації, включення усіх реакторів), тоді як в післяаварійному режимі, якому передував режим повних навантажень, реактори можуть бути відключені, а збудження генераторів (розрахункова ЕРС джерела) або коефіцієнти трансформації можуть мати найбільші значення.

Обмеження напруг в розімкнутій лінії залежить не тільки від потужності, але і від місця установки реакторів.

Реактор на початку лінії не впливає на характер розподілу напруги вздовж лінії та коефіцієнт передачі, але збільшує вхідний опір лінії, оскільки частково компенсує вхідний струм лінії, що за відсутності реактора проходив через індуктивність джерела. Для повної компенсації ємнісного струму необхідна дуже велика потужність реактора, тому на практиці повну компенсацію не здійснюють.

Лінія з реактором у кінці може бути представлена як короткозамкнена лінія з вхідним опором X_p і хвильовою довжиною φ_e , а вся лінія з реактором на кінці – як короткозамкнена лінія з хвильовою довжиною $\beta l + \varphi_e$. Це дозволяє знайти розподіл напруги $U(x)$ уздовж лінії (рис. 2.39):

$$U(x) = \underline{U}(0) \frac{\sin[\beta(l-x) + \varphi_e]}{\sin(\beta l + \varphi_e)}, \quad (2.29)$$

де x відлічується від кінця лінії.

На рис. 2.39 наведена крива розподілу струму вздовж лінії. Підвищення напруги на початковій ділянці лінії говорить про те, що по лінії проходить ємнісний струм, який знижується до нуля в точці, що відповідає максимуму напруги. Далі струм стає індуктивним, що викликає падіння напруги уздовж лінії.

При розміщенні реактора в середині лінії розподіл напруги уздовж короткозамкненої або розімкненої лінії з хвильовою довжиною $\frac{\beta l}{2} + \varphi_e$ відповідає синусоїдному або косинусоїдному закону. Криві напруги і струмів в обох випадках наведені на рис. 2.40, а, б.

Таким чином, можна зробити наступні **висновки**.

1. При більш рівномірному розподілі реакторів уздовж лінії зменшується потужність, необхідна для повної компенсації ємнісного струму. Границя, до якої наближається потужність, що необхідна для повної компенсації ємнісного струму при n ділянках лінії, дорівнює:

$$\sum q = 2n \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta l}{2n} \approx 2n \frac{\beta l}{2n} = \beta l, \quad (2.30)$$

або

$$\sum \frac{1}{X_p} = \frac{\beta l}{Z_c} = \omega C' l. \quad (2.31)$$

Останній вираз має простий фізичний сенс: в лівій частині стоїть повна провідність реакторів, а в правій – ємнісна провідність лінії.

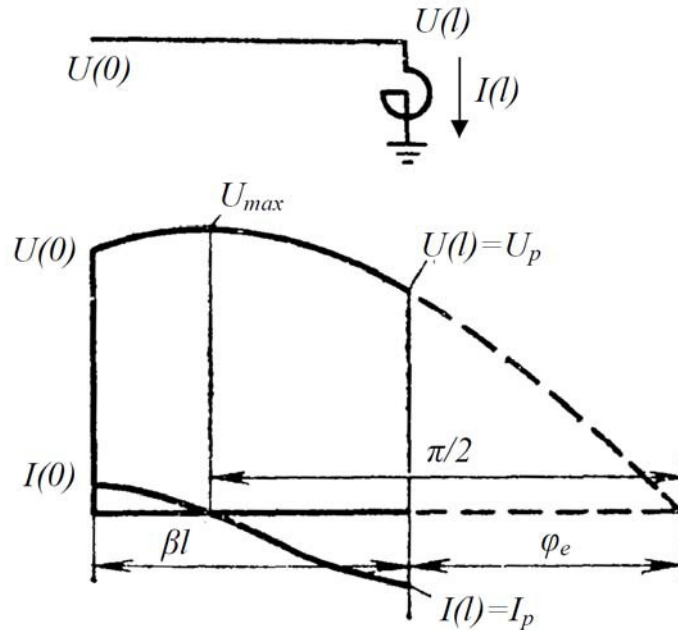


Рис. 2.39. Розподіл напруги і струму вздовж односторонньо ввімкненої лінії з реактором у кінці

2. Повна компенсація ємнісного струму не є необхідною за умовами синхронізації, якщо реактор у шин відправної системи включений на лінії, а синхронізацію необхідно здійснювати у шин відправної системи (станції), підтримуючи на шинах приймальної системи напругу, що близька до номінальної.

Реактори, що встановлені на лінії згідно з режимом малих навантажень і умовами синхронізації, не завжди можуть забезпечити обмеження сталих перенапруг в післяаварійному режимі. Наприклад, при розмиканні вимикача Q2 на лінії 1000 км (рис. 2.41), де реактори підібрані за умовами синхронізації на вимикачі Q1, максимальна напруга у кінці лінії може досягти $1,72E$ при $X_\delta = 0,25 Z_c$ та $2,1E$ при $X_\delta = 0,5 Z_c$. Подібні значення напруги недопустимі, оскільки розрядник, що спрацював в перехідному режимі, не впорається з гасінням дуги супроводжуючого струму і може зруйнуватися до того, як вимикач Q1 відключить лінію.

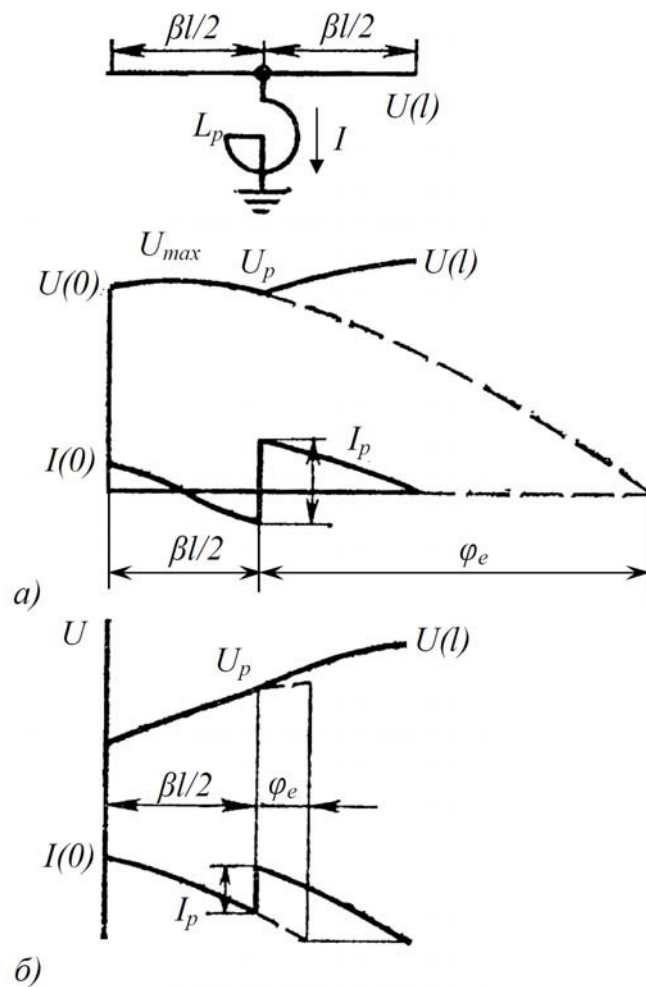


Рис. 2.40. Розподіл напруги і струму в односторонньо включеній лінії з реактором в середині лінії: *a* – при великій потужності реактора; *б* – при малій потужності реактора

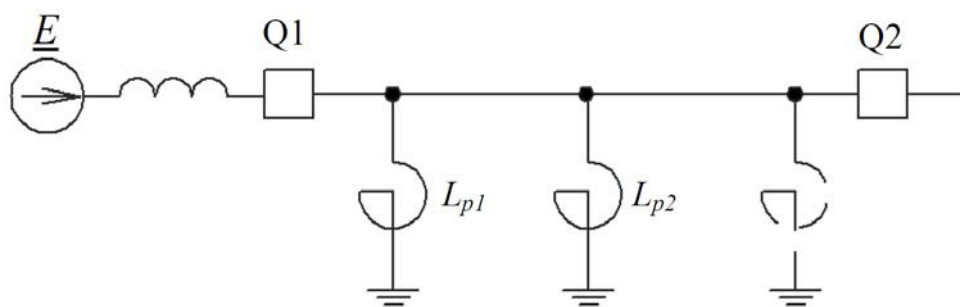


Рис. 2.41. Післяаварійний режим в лінії після відключення вимикача $Q2$

Додаткові реактори, призначені для обмеження усталених перенапруг, можуть бути підключені через іскровий проміжок. За наявності реакторів можливість резонансу на промисловій частоті в лініях довжиною до 1500 км практично унеможливується.

2.4.2. Усталені перенапруги при однофазних коротких замиканнях

При виникненні на лінії однофазного короткого замикання на неушкоджених фазах сталі перенапруги не перевищують $1,3U_{\phi}$, що допустимо з урахуванням короткочасності цього режиму. Але, як правило, вимикачі на обох кінцях лінії спрацьовують неодноразово, і протягом приблизно 1 с може існувати режим одностороннього живлення. Цей режим пов'язаний зі значними перенапругами на неушкоджених фазах, оскільки на підвищення напруги, яке обумовлено ємнісним ефектом, накладається додаткове підвищення напруги за рахунок несиметрії при однофазному короткому замиканні.

Розрахунок напруги в режимі однофазного КЗ можна виконати за допомогою методу симетричних складових. У місці замикання, наприклад на фазі А, включається еквівалентне джерело з напругою $-U_A$, яка дорівнює за значенням і є зворотною за напрямом напрузі U_A симетричного режиму. Позначимо через \underline{Z}_1 , \underline{Z}_2 і \underline{Z}_0 опори прямої, зворотної і нульової послідовностей відносно точки замикання. Струм однофазного замикання на землю визначається як:

$$\underline{I}_{\kappa 1} = \frac{3U_A}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_0}. \quad (2.32)$$

Струми різних послідовностей при цьому дорівнюють:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 = \underline{I}_0 = \frac{\underline{I}_{\kappa 1}}{3} = \frac{U_A}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_0}. \quad (2.33)$$

Напруга в кожній з фаз може бути представлена як сума чотирьох складових:

- складова напруги симетричного режиму, що існувала до КЗ;
- аварійна складова прямої послідовності:

$$\Delta \underline{U}_1 = -\underline{I}_1 \underline{Z}_1 = -\underline{U}_A \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_0}; \quad (2.34)$$

- складова зворотної послідовності:

$$\underline{U}_2 = -\underline{I}_2 \underline{Z}_2 = -\underline{U}_A \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_0}; \quad (2.35)$$

- складова нульової послідовності:

$$\underline{U}_0 = -\underline{I}_0 \underline{Z}_0 = -\underline{U}_A \frac{\underline{Z}_0}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_0}. \quad (2.36)$$

Для точок, віддалених від шин генераторної напруги, опори \underline{Z}_1 і \underline{Z}_2 близькі і можна прийняти $\underline{Z}_1 \approx \underline{Z}_2$. Позначивши $\underline{Z}_0 / \underline{Z}_1 = \underline{Z}_0 / \underline{Z}_2 = \underline{m}$, отримуємо:

$$\Delta \underline{U}_1 = \underline{U}_2 = -\underline{U}_A \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_0 + 2\underline{Z}_1} = -\frac{1}{\underline{m} + 2} \underline{U}_A, \quad (2.37)$$

$$\underline{U}_0 = -\underline{U}_A \frac{\underline{Z}_0}{\underline{Z}_0 + 2\underline{Z}_1} = -\frac{\underline{m}}{\underline{m} + 2} \underline{U}_A. \quad (2.38)$$

На рис. 2.42 приведена векторна діаграма, побудована для випадку, коли опори усіх послідовностей можна прийняти чисто реактивними і $m > 1$. У пошкодженій фазі А три складових напруги $\Delta \underline{U}_1$, \underline{U}_2 і \underline{U}_0 співпадають по напрямку і в сумі дають вектор $(-\underline{U}_A)$, тобто сумарна напруга дорівнює нулю. У двох інших фазах В і С складові нульової послідовності мають той же напрям, що і в пошкодженій фазі, а складові прямої і зворотної послідовностей зрушуються на кути $\pm 120^\circ$. Сума векторів $a^2 \Delta \underline{U}_1$ і $a \Delta \underline{U}_2$ або $a \underline{U}_1$ і $a^2 \underline{U}_2$, зрушених відносно один одного на кут 120° , є вектором, що лежить на лінії вектора \underline{U}_0 , але має зворотний напрям ($m > 0$). Таким чином, геометрична сума складових $\Delta \underline{U}_1$, \underline{U}_2 і \underline{U}_0 в неушкоджених фазах, яка позначена $\Delta \underline{U}$, дорівнює:

$$\Delta \underline{U} = \underline{U}_0 + a^2 \Delta \underline{U}_1 + a \Delta \underline{U}_2 = \underline{U}_0 - \Delta \underline{U}_1 = \frac{m-1}{m+2} \Delta \underline{U}_A. \quad (2.39)$$

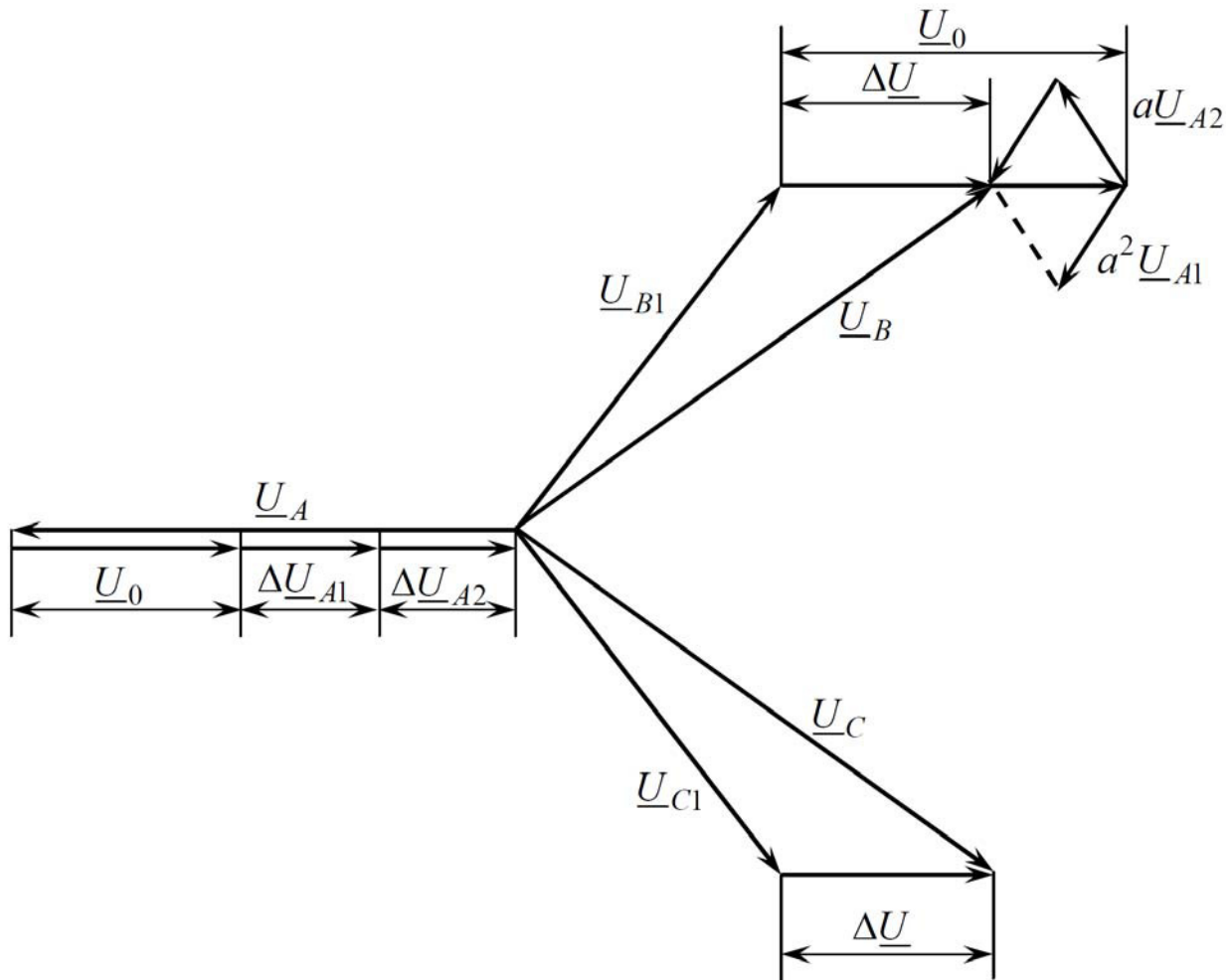


Рис. 2.42. Векторна діаграма напруг при однофазному КЗ

З векторної діаграми можна встановити:

$$U_B = U_C = U_A \sqrt{\left(\frac{3m}{2(m+2)}\right)^2 + \frac{3}{4}}. \quad (2.40)$$

Для систем із заземленою нейтраллю характерно $1 < m < 3$. Верхні значення m можуть мати місце в точках мережі, віддалених від джерел живлення, де опори \underline{Z}_0 і \underline{Z}_1 визначаються в основному опорами лінії, а відношення індуктивностей нульової і прямої послідовностей лінії близько до трьох.

З урахуванням того, що максимальна робоча напруга складає 1,15-1,1 номінальної (лінійної), отримаємо напругу на неушкоджених фазах при $m=3$:

$$U_B = U_C = (1,1 \div 1,15) \cdot 1,25 \frac{U_{ном}}{\sqrt{3}} = (0,79 \div 0,83) U_{ном}. \quad (2.41)$$

У мережах з ізольованою нейтраллю трансформаторів можна приблизно вважати, що $m \rightarrow \infty$. Тоді максимальна напруга на неушкоджених фазах дорівнює $U_B = U_C \approx 1,1 U_{ном}$.

Максимальна напруга на неушкоджених фазах визначає вибір грозозахисних розрядників. У системах з ізольованою нейтраллю трансформаторів застосовуються 110%-ві розрядники, розраховані на напругу гасіння $1,1 U_{ном}$. В системах із заземленою нейтраллю використовуються 80%-ві розрядники, у яких гасіння дуги здійснюється при $0,8 U_{ном}$ і дає можливість зменшити опір нелінійного резистора, а отже, і напругу, що залишається, на розряднику.

2.4.3. Перенапруги промислової частоти при неповнофазних режимах роботи

Небезпечні підвищення напруги резонансного характеру можуть виникнути при неповнофазних режимах, коли при включенні або відключенні в лінії з високою мірою компенсації відмовили одна або дві фази вимикача. Розгляд почнемо з випадку короткої лінії з реакторами, для якої можна скласти спрощену схему заміщення із зосередженими ємностями (рис. 2.43, а). Лінія представлена зосередженими ємностями на землю $C_0 l$ і міжфазними ємностями $C_{мф} l$. Для обчислення напруги \underline{U}_A на фазі, що не включилася, трифазну схему можна привести до еквівалентної однофазної (рис. 2.43, б), ЕРС якої дорівнює $0,5E$. З однофазної схеми можна встановити, що:

$$\underline{Z}_0 = j \frac{\omega L_p}{1 - \omega^2 L_p C_0 l}. \quad (2.42)$$

При $\omega^2 L_p C_0 l$, що відповідає перекомпенсації ємнісного струму в схемі нульової послідовності, еквівалентний опір \underline{Z}_0 набуває індуктивного характеру; його послідовне з'єднання з ємнісним опором $1/(j2\omega C_{мф} l)$ може призвести до істотного підвищення напруги на фазі, що не включилася:

$$\underline{U}_A = -E \frac{\omega^2 L_p C_{мф} l}{1 - \omega^2 L_p (C_0 + 2C_{мф}) l}. \quad (2.43)$$

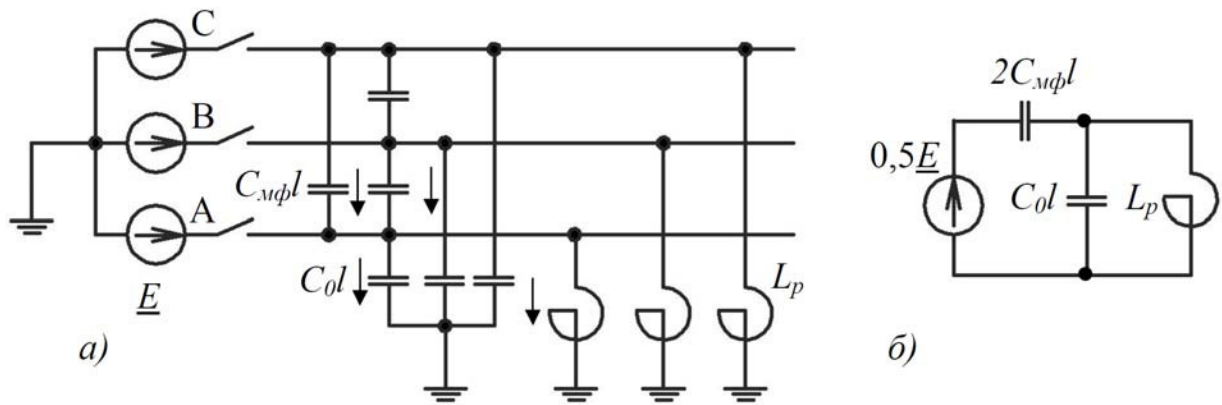


Рис. 2.43. Розрахункова трифазна схема при однофазному розриві в короткій розімкненій лінії з реакторами (а) і однофазна схема заміщення (б)

При двофазному розриві у фазах А і В аналогічним чином:

$$\underline{U}_A = \underline{U}_B = \underline{E} \frac{\omega^2 L_p C_{mf} l}{1 - \omega^2 L_p (C_0 + C_{mf}) l}. \quad (2.44)$$

Умовам резонансу в розглянутій схемі відповідають рівняння:

- при однофазному розриві

$$\omega^2 L_p (C_0 + 2C_{mf}) l = 1; \quad (2.45)$$

- при двофазному розриві

$$\omega^2 L_p (C_0 + C_{mf}) l = 1. \quad (2.46)$$

У неповнофазних режимах в лініях з високою мірою компенсації резонансні перенапруги мають вузьку область резонансу. Отже, їх максимальні значення залежать від активних втрат, особливо від втрат на корону. Сильний вплив корони пояснюється тим, що її активна провідність включається послідовно з великим ємнісним опором.

Резонансні перенапруги, пов'язані з неповнофазними режимами, можуть виникати в системах за наявності на початку або у кінці лінії ненавантажених трансформаторів, що мають з'єднані в трикутник обмотки низької напруги.

На рис. 2.44, а зображена трифазна схема системи із заземленою нейтраллю при однофазному розриві в короткій лінії з трансформатором на кінці, а на рис. 2.44, б – еквівалентна однофазна схема. Проходження струмів в двох фазах первинної обмотки трансформатора, що включилися, викликає появу в двох відповідних фазах вторинної обмотки ЕРС E , зрушених одна відносно одної на кут 120° . Сума цих ЕРС, що також дорівнює E , викликає у вторинній обмотці струм, який створює потік в магнітопроводі фази, що не включилася. Завдяки зворотній трансформації в первинній обмотці індукується ЕРС, яка дорівнює E . У результаті обмотка, що сполучена в трикутник і має індуктивність розсіяння L_d на фазу, може розглядатися як джерело ЕРС з внутрішнім опором $3X_d = 3\omega L_d$, що приєднано до пошкодженої фази разом з ЕРС $0,5E$ з внутрішнім опором, який визначається ємністю $2C_{mf} l$ за рахунок зв'язку ємності з неушкодженими фазами.

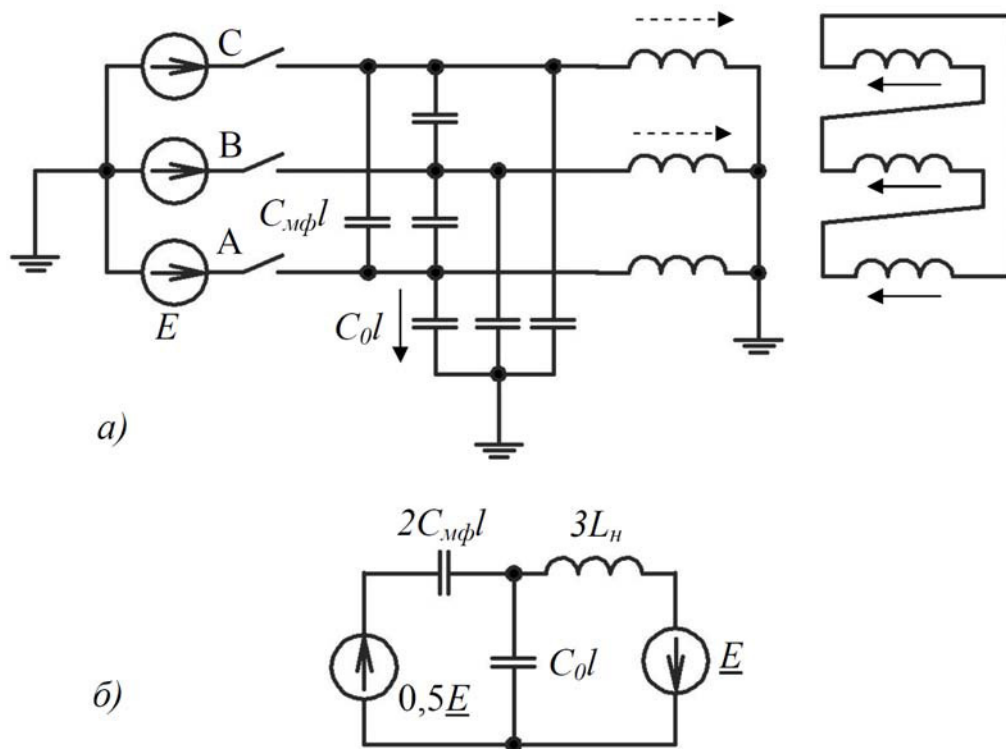


Рис. 2.44. Неповнофазний режим в короткій лінії з трансформатором на кінці (а) і однофазна схема заміщення (б)

Іншими словами, напруга на фазі, що не включилася, обумовлена, з одного боку, ємнісним зв'язком з фазами, що включилися, а з іншого – електромагнітним зв'язком між обмотками. Додаткова електрорушійна сила, що виникає при цьому в результаті зворотної трансформації, прикладена до контуру, що містить індуктивність $3L_d$ і ємність $(C_0 + 2C_{mf}) \cdot l$. Умова резонансу в такій схемі має вигляд

$$\frac{1}{\omega \cdot (C_0 + 2C_{mf}) \cdot l} = 3\omega L_d. \quad (2.47)$$

Слід відмітити, що виникнення резонансу при неповнофазному режимі в розглянутій схемі є цілком реальним, особливо у разі застосування триобмоткових трансформаторів або автотрансформаторів, у яких третинна обмотка, сполучена в трикутник, має значно меншу потужність, ніж обмотки вищої і середньої напруги. Внаслідок цього індуктивність розсіювання обмотки нижчої напруги, приведена до потужності трансформатора, виявляється значною для автотрансформаторів 330 кВ.

Таким чином, резонансні умови при неповнофазних режимах можуть мати місце для значно менших довжин лінії, ніж при симетричному режимі.

2.4.4. Ферорезонансні перенапруги

Ферорезонансні перенапруги виникають в електропередачі, коли через різні причини відбувається насичення магнітопроводів електричних машин і трансформаторів.

На рис. 2.45 приведена типова характеристика намагнічення трансформатора зі струмом намагнічення, що дорівнює 2% номінального струму трансформатора (крива 1).

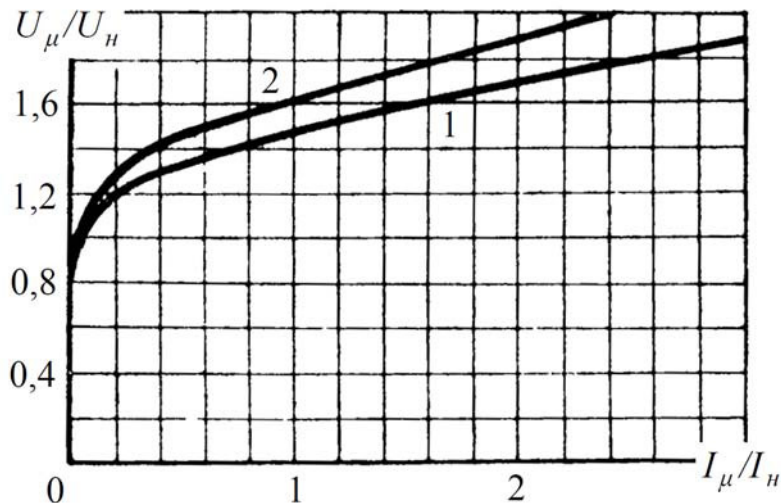


Рис. 2.45. Характеристика намагнічення трансформатора: 1 – залежність між амплітудами напруги і струму, що намагнічує; 2 – залежність між амплітудами струму і напруги основної частоти

При номінальній напрузі струм намагнічення не перевищує 2-4% номінального струму трансформатора, а при збільшенні напруги вище номінального різко зростає, досягаючи значення номінального струму. При цьому відбувається спотворення форми кривою струму, зростає доля вищих гармонік, так що амплітуда основної гармоніки струму може складати 50-70% його максимального значення (крива 2). Проходження несинусоїдного струму, що намагнічує, через елементи схеми створює несинусоїдне падіння напруги; отже, на трансформаторі і в інших точках електропередачі з'являється напруга вищих гармонік.

Через зростання струму намагнічення трансформатора при насиченні в деяких випадках відбувається обмеження напруги промислової частоти. Наприклад, в схемах далеких передач трансформатор при насиченні може розглядатися як нелінійний реактор, що частково компенсує ємнісний струм лінії.

Якщо опір схеми відносно ненавантаженого або несуттєво навантаженого трансформатора носить ємнісний характер, то при цьому можуть виникнути значні перенапруги. Вони є типовим прикладом резонансу в нелінійних колах (ферорезонансу), на промисловій частоті (гармонійний резонанс) або на вищих і нижчих гармоніках (негармонійний резонанс).

Багато конкретних випадків виникнення ферорезонансних перенапруг можна проаналізувати на основі простого ферорезонансного контуру, що

складається з ємності, нелінійної індуктивності і активного опору, приєднаного до джерела синусоїдної напруги (рис. 2.46). Нелінійна характеристика залежності амплітуди основної гармоніки струму від амплітуди напруги промислової частоти зазвичай задається графічно.

Основне співвідношення для контуру на рис. 2.46:

$$E^2 = (U_L - U_C)^2 + (IR)^2. \quad (2.48)$$

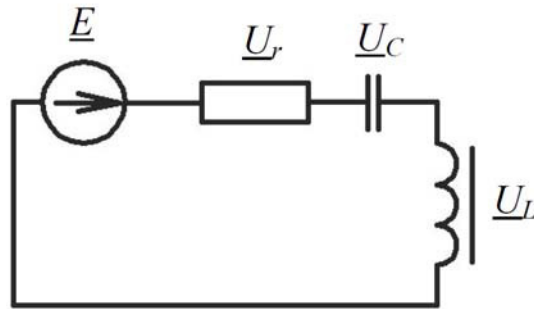


Рис. 2.46. Коливальний контур з нелінійною індуктивністю

З урахуванням того, що $U_C = I/(\omega C)$,

$$U_L = I/(\omega C) \pm \sqrt{E^2 - (IR)^2}. \quad (2.49)$$

Підкорінний вираз в рівнянні (2.49) є кривою еліпса з центром на початку координат (рис. 2.47) і півосями, рівними E (вертикальна вісь) і E/R (горизонтальна вісь). Сума ординат еліпса і прямої $I/\omega C$, тангенс кута α нахилу якої пропорційний ємнісному опору, дає праву частину (2.49). При $R=0$ еліпс перетворюється на дві паралельні прямі $I/\omega C \pm E$. Точки перетину еліпса (в окремому випадку двох паралельних прямих) з вольт-амперною характеристикою $U_L = f(I)$ дають можливі стани рівноваги схеми.

На рис. 2.47 показано три точки перетину вольт-амперної характеристики з паралельними прямими $I/\omega C \pm E$ (точки a , b , c). У точці a напруга на ємності більше напруги на індуктивності, струм випереджає по фазі ЕРС джерела (векторна діаграма рис. 2.48, a), тобто має ємнісний характер. У точках b і c напруга на індуктивності більше напруги на ємності, струм відстає по фазі від ЕРС джерела (векторна діаграма на рис. 2.48, b), тобто має індуктивний характер. Слід зазначити, що не всі з цих режимів є стійкими.

Перевірка стійкості розв'язку здійснюється зазвичай шляхом аналізу поведінки схеми при невеликій зміні параметра, в даному випадку струму в колі. При стійкому стані система при малих збуреннях намагається повернутися в початкове положення. Якщо в схемі існує ємнісний режим, що відповідає точці a , і відбувається мале збільшення струму, то напруга на ємності збільшується більшою мірою, ніж напруга на індуктивності. А оскільки небаланс напруг $\Delta U = E + U_L - U_C < 0$, що при цьому виникає, спрямований проти струму I , то схема повертається в початковий стан, тобто режим, який відповідає точці a , є стійким.

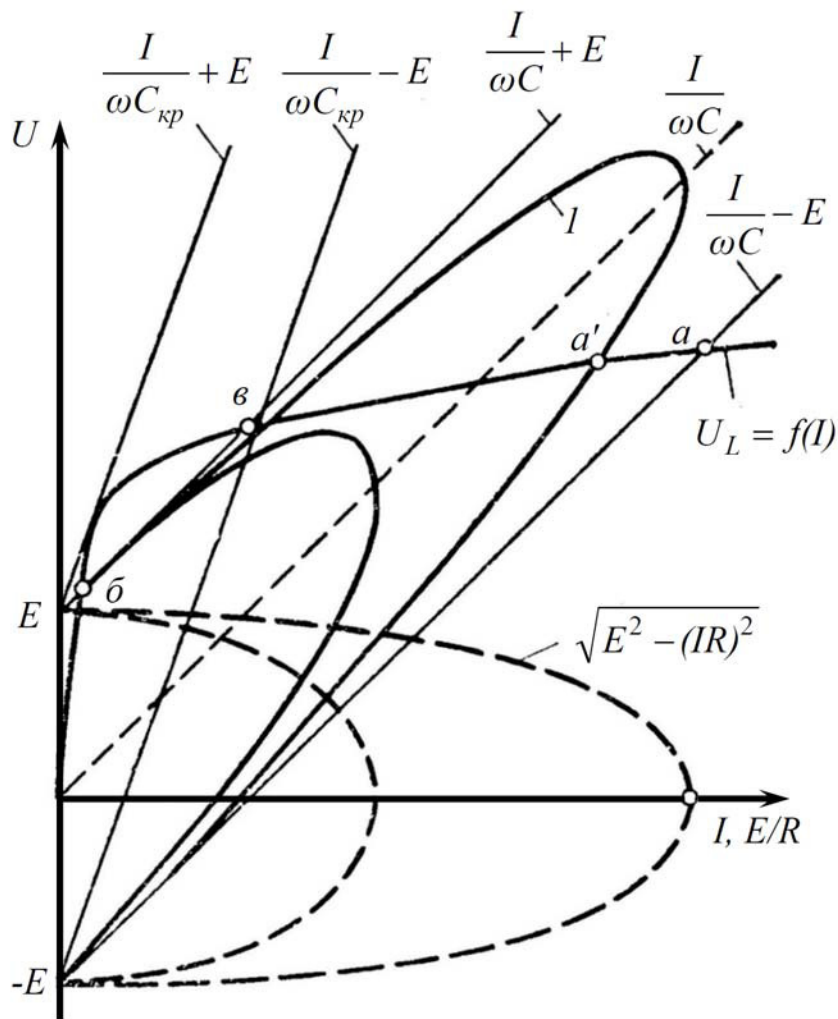


Рис. 2.47. Графічне визначення напруги у ферорезонансному контурі

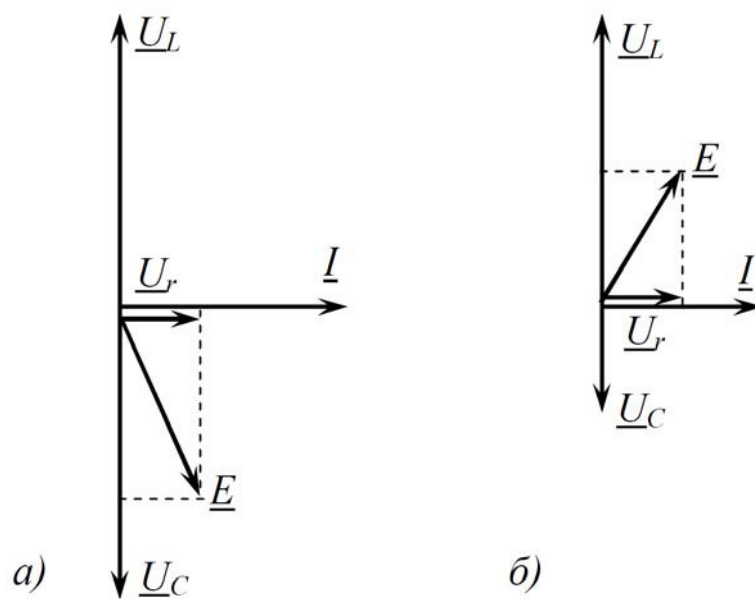


Рис. 2.48. Векторні діаграми для ферорезонансного контуру:
а – ємнісний режим; б – індуктивний режим

Малий приріст струму в точці *б* призводить до того, що напруга на індуктивності росте більшою мірою, чим напруга на ємності, умова небалансу набирає вигляду $\Delta U = E + U_C - U_L < 0$, що викликає повернення схеми в початковий стан. Таким чином, режим, що відповідає точці *б*, теж є стійким. Інше співвідношення складається для точки *в*. Небаланс напруги при невеликому збільшенні струму $\Delta U = E + U_C - U_L > 0$ позитивний, що і призводить до безперервного зростання струму, поки не встановиться режим, який відповідає точці *а*.

2.4.5. Питання для самоперевірки

1. Які причини викликають підвищення напруги в кінці розімкненої лінії електропередачі?
2. Яка величина називається коефіцієнтом передачі ЛЕП?
3. В чому полягає «ємнісний ефект», що проявляється в лініях надвисокої напруги великої довжини?
4. Який вплив чинять реактори на підвищення напруги в кінці розімкненої лінії?
5. Пояснити причину виникнення усталених перенапруг при однофазних коротких замиканнях.
6. Розкрийте фізичну сутність небезпечних підвищень напруги резонансного характеру при неповнофазних режимах лінії з високою мірою компенсації, коли при включенні або відключенні відмовили одна або дві фази вимикача.
7. Які фактори призводять до виникнення ферорезонансних перенапруг в електропередачах?
8. Які наслідки ферорезонансних перенапруг?

РОЗДІЛ 3. ВИСОКОВОЛЬТНІ ІЗОЛЯЦІЙНІ КОНСТРУКЦІЇ ТА ВИПРОБУВАЛЬНІ УСТАНОВКИ

3.1. Координація ізоляції, ізоляція повітряних ліній електропередачі та відкритих розподільчих пристроїв

Координація ізоляції. Ізоляція повітряних ліній електропередачі. Лінійні ізолятори. Ізолятори та ізоляційні конструкції відкритого розподільчого пристрою. Ізоляційні конструкції з газовою ізоляцією.

3.1.1. Координація ізоляції

При проектуванні електропередач і виборі ізоляції устаткування необхідно забезпечити оптимальну з економічної точки зору надійність роботи ізоляції з урахуванням характеристик захисних розрядників і інших засобів для обмеження перенапруг, що застосовуються.

Під координацією ізоляції розуміється встановлення і підтримання під час експлуатації необхідного співвідношення між електричною міцністю ізоляції і напругою, що впливає на неї. При цьому може бути допущена деяка незначна економічно виправдана імовірність ушкодження ізоляції або перерва в електропостачанні менш відповідальних споживачів. У табл. 3.1 та 3.2 наведені окремі стандартні рівні ізоляції електрообладнання.

Таблиця 3.1

Стандартні рівні ізоляції при найбільшій робочій напрузі обладнання до 245 кВ

| Найбільша робоча напруга обладнання (діюче значення), кВ | Стандартна витримувана короточасна напруга промислової частоти (діюче значення), кВ | Стандартна витримувана напруга грозового імпульсу (максимальне значення), кВ |
|--|---|--|
| 7,2 | 20 | 40 60 |
| 12 | 28 | 60 75 95 |
| 72,5 | 140 | 325 |
| 123 | 230 | 550 |

Координація ізоляції ліній електропередачі при робочій напрузі передбачає такий її вибір, при якому забезпечується дуже мале середнє число перекриттів зовнішньої ізоляції (повітряних проміжків і лінійних ізоляторів) і необхідний термін служби за умовами пробою твердого ізоляційного матеріалу ізолятора (фарфор, скло, склопластик). При цьому мають бути враховане забруднення і зволоження зовнішньої ізоляції і старіння твердої ізоляції ізоляторів під впливом електромеханічного навантаження.

Координація ізоляції при квазістаціонарних тривалих перенапругах передбачає такий вибір характеристик ізоляції і захисних пристроїв, при якому забезпечується досить мала імовірність перекриття зовнішньої ізоляції з урахуванням впливу забруднення і зволоження ізоляції на її електричну міцність.

Таблиця 3.2

Стандартні рівні ізоляції при найбільшій робочій напрузі
обладнання більше 245 кВ

| Найбільша робоча напруга обладнання (діюче значення), кВ | Стандартна витримувана напруга комутаційного імпульсу, кВ | | | Стандартна витримувана напруга грозового імпульсу (максимальне значення), кВ |
|---|--|--|---|--|
| | Поздовжня ізоляція (максимальне значення) | Відносно землі (максимальне значення) | Між фазами (відношення до максималь- ного значення відносно землі) | |
| 362 | 850 | 850 | 1,50 | 950 |
| | 850 | 950 | 1,50 | 1050 |
| 765 | 1175 | 1300 | 1,70 | 1675 |
| | 1175 | 1425 | 1,70 | 1800 |

Координація лінійної ізоляції при комутаційних перенапругах має ґрунтуватися на статистичному техніко-економічному аналізі. В якості першого наближення на підставі ряду техніко-економічних розрахунків можна приймати середнє число перекриттів ізоляції лінії типової довжини приблизно 1 раз протягом 10 років.

Координація ізоляції повітряних проміжків, підвісних і опорних ізоляторів при робочій напрузі і перенапругах здійснюється згідно з тими ж принципами, що і для лінійної ізоляції, але зі значно вищим показником надійності (приблизно одна відмова в 50-100 років).

Практична реалізація статистичного техніко-економічного підходу до координації ізоляції електроустаткування ускладнена внаслідок обмеженого об'єму інформації по електричній міцності несамовідновної ізоляції, що безперервно старіє під час експлуатації.

Координація внутрішньої ізоляції електроустаткування при робочій напрузі допускає такий вибір напруженостей, при якому забезпечується термін її служби з урахуванням старіння в експлуатаційних умовах.

Координація ізоляції електроустаткування при внутрішніх перенапругах полягає у виборі найбільш доцільних значень однохвилинної випробувальної напруги промислової частоти, випробувальної напруги комутаційним імпульсом, а для зовнішньої ізоляції, крім того, у виборі витримуваної напруги при плавному підйомі в сухому стані і під дощем.

При глибокому обмеженні комутаційних перенапруг значення однохвилинної випробувальної напруги промислової частоти може виявитися

занадто низьким, що не забезпечує надійної роботи внутрішньої ізоляції при робочій напрузі. У зв'язку з цим для деяких типів устаткування передбачається випробування підвищеною напругою (1,3-1,6 в.о.) протягом 30-60 хв. з вимірюванням характеристик часткових розрядів в процесі випробування.

Координація ізоляції електроустаткування при грозових перенапругах полягає у виборі імпульсної випробувальної напруги ізоляції з урахуванням характеристик вентильних розрядників і ОПН, відстані між устаткуванням і розрядником і довжини захищеного підходу лінії до підстанції. При цьому має бути забезпечений порівняно високий показник надійності грозозахисту (приблизно 1 відключення в 100 років).

Економічно найбільш доцільною є координація ізоляції, що передбачає такі заходи по обмеженню внутрішніх і грозових перенапруг, при яких основні габаритні розміри ізоляції, обрані за умовою надійної роботи при робочій напрузі, також забезпечуватимуть надійну роботу при дії внутрішніх і грозових перенапруг. Часто такий комплекс заходів називають приведенням ізоляції "до норми".

3.1.2. Ізоляція повітряних ліній електропередачі

Основною ізоляцією повітряних ліній є атмосферне повітря. Незважаючи на його порівняно низьку електричну міцність, повітряна ізоляція має переваги, завдяки яким її широко застосовують для передачі електричної енергії. По-перше, це простота конструкції і мала, в порівнянні з іншими способами передачі електроенергії, вартість повітряної лінії. По-друге, відсутність старіння, тобто зміни електричних характеристик при тривалій експлуатації. По-третє, здатність відновлювати свої ізолюючі властивості після згасання розряду. Цю властивість використовують для організації автоматичного повторного ввімкнення.

Найбільш характерними проміжками повітряних ліній є наступні повітряні проміжки:

- між дротом і землею;
- між сусідніми дротами;
- між дротом і транспортом, який може їхати під дротами лінії електропередачі;
- проміжок між дротом і грозозахисним тросом.

Дроти на опорі кріпляться за допомогою ізоляторів. При висоті дроту над землею $> 12\text{м}$ наявність під дротом транспорту практично не впливає на розрядну напругу.

Розрядна напруга повітряних проміжків залежить від їх довжини, форми електродів, метеорологічних умов, тривалості дії і швидкості наростання напруги. Пробій повітряних проміжків, характерних для повітряних ліній, відбувається, як правило, в лідерній формі.

3.1.3. Лінійні ізолятори

Лінійні ізолятори за конструкцією поділяються на (рис. 3.1): тарілчасті, штирові, стержневі.

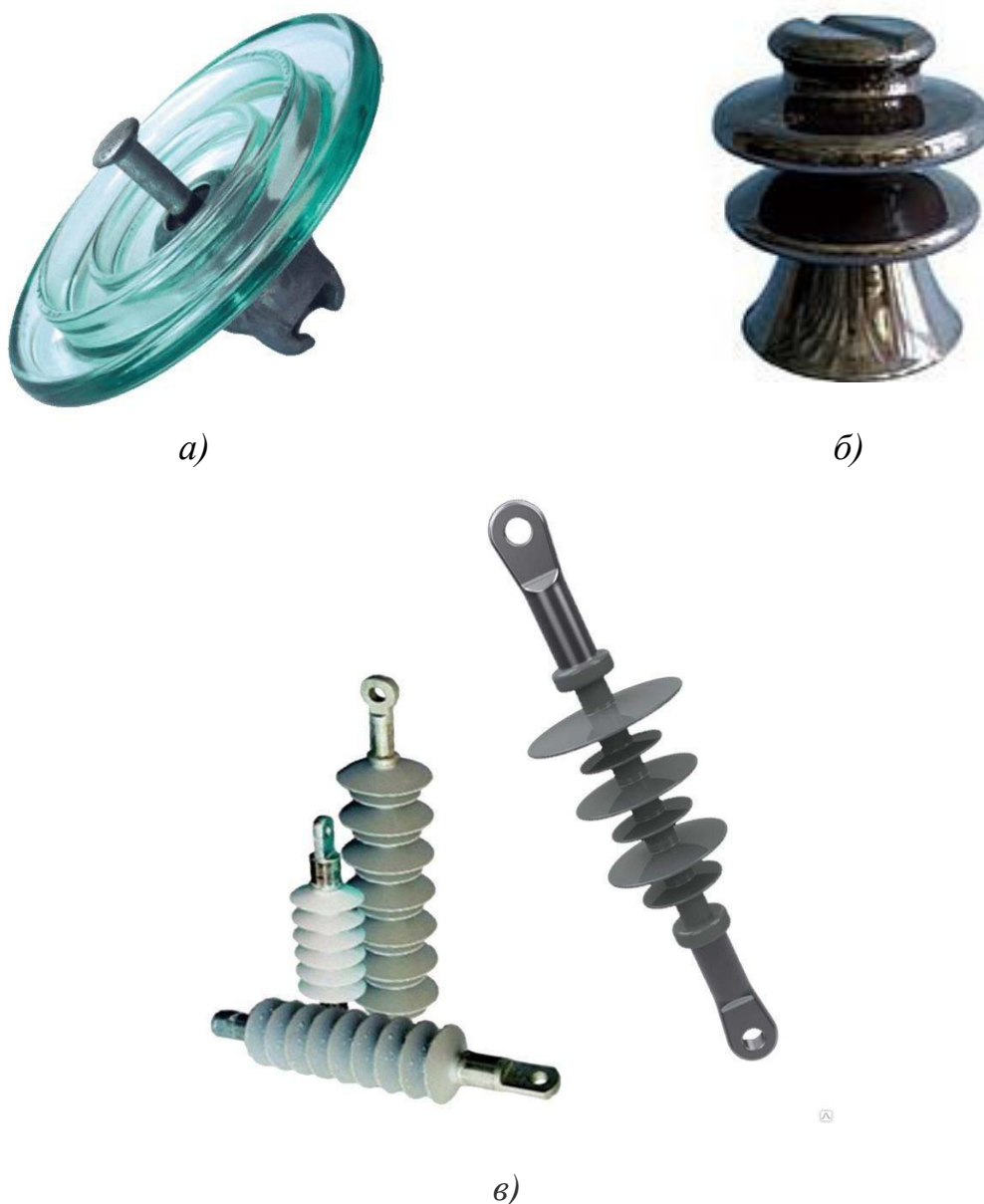
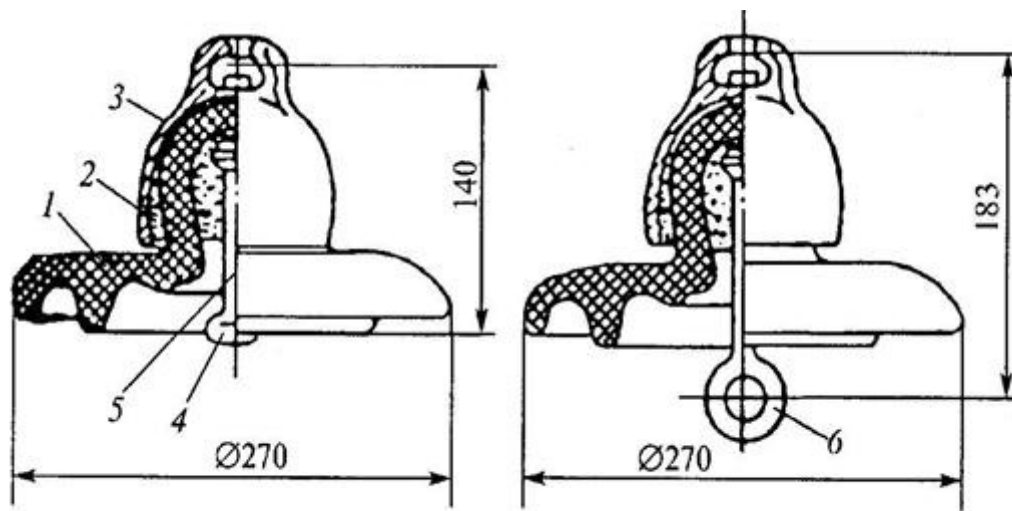


Рис. 3.1. Лінійні ізолятори: *а* – лінійний підвісний тарілчастий скляний ізолятор ПС 70Е; *б* – штировий фарфоровий ізолятор ШФ-20; *в* – стержневий підвісний полімерний ізолятор ЛК 120/110-И-2 ГС

Тарілчасті і штирові ізолятори виготовляють з електротехнічного фарфору або загартованого скла, стержневі – з високоміцного фарфору або полімерів. Останнім часом більшість тарілчастих ізоляторів виготовляється із загартованого скла, такі ізолятори більш дешеві і зручні в експлуатації. Ізолятори спроектовані так, що в сухому стані напруга перекриття перевищує пробивну напругу приблизно в 1,6 раз, що забезпечує відсутність пробоя при перенапругах.

Тарілчастий підвісний ізолятор (рис. 3.2) складається з чавунної «шапки» 3, ізолюючого елементу 1 («тарілки») з фарфору або скла (склофарфору) і сталевого стрижня 5, що закінчується товкачем 4 (рис. 3.2,

а) або сережкою 6 (рис. 3.2, б). Ізолюючий елемент сполучений з шапкою і стрижнем за допомогою цементного розчину 2. У фіксаторного тарілчастого ізолятора шапка має патрубок з різьбленням для жорсткого з'єднання із стрижнем фіксатора, а стрижень закінчується сережкою 6.



а)

б)

Рис. 3.2. Підвісний тарілчастий ізолятор

При напрузі, меншій від розрядної, біля товкача і шапки ізолятора виникає коронний або ковзний розряди, які створюють радіоперешкоди, тому однією з характеристик ізолятора є напруга, що відповідає допустимому рівню радіоперешкод, яка складає 25-40 кВ, в залежності від типу ізолятора. Для підвищення напруги виникнення коронного розряду край шапки закруглюють, а поверхню цементно-пісочної зв'язки покривають напівпровідним лаком.

Також на повітряних лініях застосовуються довгостержневі ізолятори з високоміцного фарфору. Оскільки фарфор працює в таких ізоляторах на розтягування, то їх механічна міцність менше тарілчастих. Останніми роками розроблені полімерні довгостержневі ізолятори (рис. 3.1, в), які мають істотно менші діаметр і вагу, ніж у фарфорових ізоляторів.

На відміну від підвісних, штирові ізолятори жорстко кріпляться на опорі за допомогою металевого штиря або крюка (рис. 3.3). В експлуатаційному режимі роботи до штирового ізолятора прикладена вигинаюча сила, що обумовлена вагою дроту і вітровим навантаженням. З техніко-економічних міркувань із зростанням номінальної напруги повітряної лінії збільшують довжину прольоту і вигинаюча сила вже на лінії 35 кВ наближається до допустимої руйнівної сили на вигин, тому штирові ізолятори застосовують лише на лініях до 35 кВ.

За необхідності отримати вищі розрядні характеристики ізолятори сполучають послідовно в гірлянди (рис. 3.4). Вузол кріплення сконструйований шарнірним, тому на ізолятор діє тільки розтягуюча сила.



Рис. 3.3. Штировий ізолятор ШТИЗ-20-В, що кріпиться до траверси

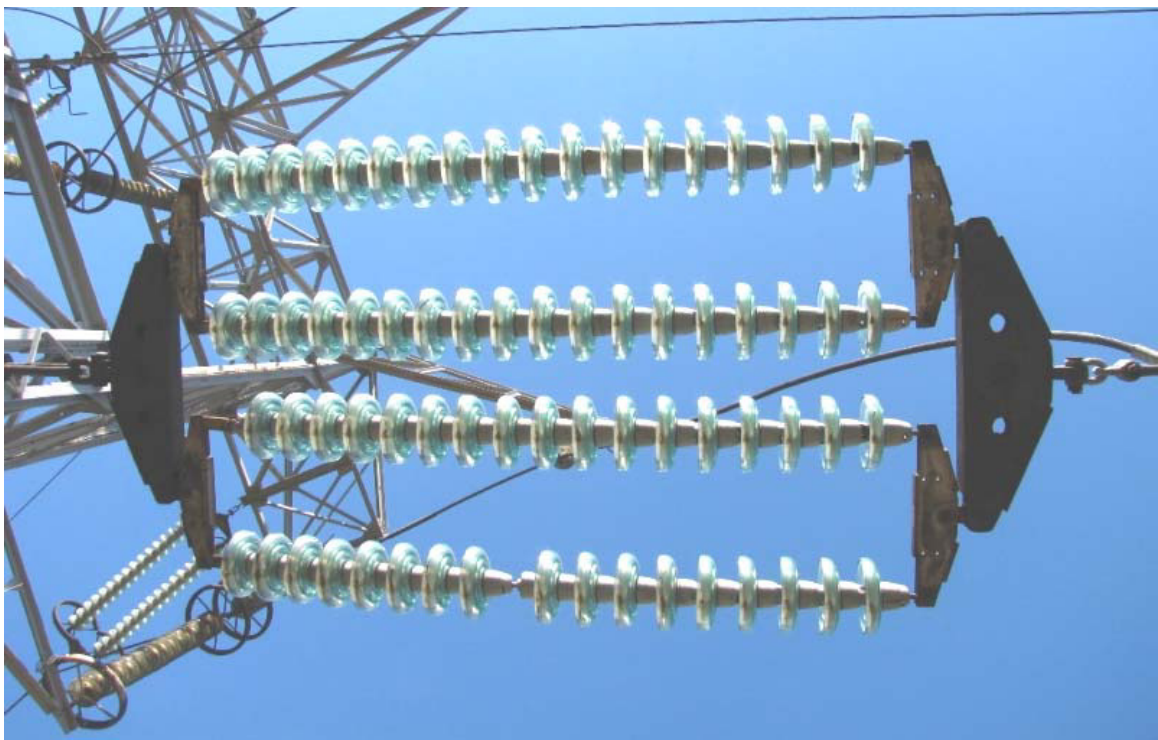


Рис. 3.4. Гірлянда ізоляторів на кінцевій опорі ЛЕП 150 кВ

Ізолятори на анкерних опорах в нормальному експлуатаційному режимі повинні витримувати натягнення дротів, тоді як на проміжних опорах, лише вагу дротів одного прольоту. Тому на проміжних опорах дроти до гірлянди кріпляться за допомогою спеціальних затисків, що дозволяють в аварійному режимі дротам прослизати в затисках і тим зменшувати навантаження на ізолятори і опору (рис. 3.5).



Рис. 3.5. Кріплення дроту до гірлянди ізоляторів на проміжній (а) та анкерній (б) опорах: 1 – траверса, 2 – гірлянда ізоляторів, 3 – затискач, 4 – дріт

Гірлянди ізоляторів кріпляться до опори шарнірно, тому при вітрі гірлянда відхиляється від вертикального положення і може наблизитися до стійки опори. Для фіксації дроту на опорі застосовують V-подібну підвіску. Це дозволяє, не змінюючи довжини гірлянди, істотно зменшити відстань від дроту до траверси і тим понизити висоту опори і її вартість. Зменшення висоти опори можна досягти, застосовуючи частково або повністю ізолюючі опори або ізолюючі траверси. На лініях 6-10 кВ знайшли застосування залізобетонні опори з ізолюючими траверсами із спеціального епоксидного компаунда, що дозволяє відмовитися від ізоляторів.

Важливим параметром ізоляторів є довжина шляху витoku – найкоротша відстань уздовж поверхні ізолюючої деталі між металевими частинами, що знаходяться під різними потенціалами. Ізолятори, призначені для роботи в районах з чистою атмосферою, мають відношення довжини шляху витoku до будівельної висоти близько 2,2; ізолятори, призначені для роботи в районах із забрудненою атмосферою, мають вказане відношення до 3,2.

Розглянемо розрядну напругу гірлянди ізоляторів. Кріплення гірлянди до траверси опори і дроту до ізолятора здійснюється за допомогою металевої арматури. Для сухих ізоляторів розрядна напруга гірлянди зі стандартною арматурою практично не залежить від типу ізолятора і визначається довжиною повітряного проміжку між дротом і траверсою.

Зволоження чистих ізоляторів дощем призводить до зниження розрядної напруги гірлянди в тим більшій мірі, чим більша інтенсивність дощу і тривалість дії напруги. При зливових дощах з інтенсивністю 3 мм/мін і тривалому прикладанні напруги промислової частоти розрядна напруга чистих ізоляторів знижується на 20-30% в порівнянні з розрядною напругою сухих ізоляторів. При дії комутаційних імпульсів позитивної полярності зниження 50%-ї розрядної напруги складає 10-20%.

Оскільки при дощі розряд розвивається частково по поверхні ізолятора, середня розрядна напруженість по будівельній висоті ізолятора дещо знижується при збільшенні відношення будівельної висоти до діаметру ізолятора. 50%-а імпульсна розрядна напруга гірлянди з чистих ізоляторів перевищує 50%-у розрядну напругу при комутаційному імпульсі тривалістю 4000 мкс приблизно на 15%. Стан поверхні ізоляторів практично не впливає на 50%-у розрядну напругу при дії грозових імпульсів.

При тривалій дії напруги розрядна напруга гірлянди ізоляторів залежить від стану їх поверхні. Зазвичай в процесі експлуатації на поверхні ізоляторів утворюється шар забруднення. У сухому стані він не впливає на розрядну напругу ізоляторів. При зволоженні вологою туману, роси, дощу шар стає провідним, що призводить до істотного зниження розрядної напруги гірлянди ізоляторів. Величина зниження залежить від типу ізоляторів, тривалості дії напруги, від міри забрудненості поверхні ізоляторів. Також помітне зниження розрядної напруги може спостерігатися при таненні шару льоду на поверхні ізолятора.

3.1.4. Ізолятори та ізоляційні конструкції відкритого розподільчого пристрою

Зовнішня ізоляція підстанції складається з повітряних проміжків, ізоляторів і ізоляційних конструкцій.

У відкритих розподільчих пристроях для кріплення на порталах дротів, шин, апаратів застосовують підвісні лінійні ізолятори. Для ізолюваного жорсткого кріплення шин або елементів апаратів, що знаходяться під високою напругою, застосовують опорні ізолятори або ізоляційні конструкції, які встановлюють для забезпечення безпеки обслуговуючого персоналу на залізобетонних підставках висотою 2,5 м.

Опорні ізолятори розділяють на штирові, стержневі, порожнисті (рис. 3.6).

Опорні стержневі ізолятори по конфігурації ізолюючої деталі практично схожі з конфігурацією стержневих лінійних ізоляторів. Існує лише відмінність в конфігурації фланців і діаметрі стержня ізоляторів. Конструкція фланців повинна дозволити кріпити їх до основи, жорстко сполучати ізолятори один з одним в колонки. Для цього поверхню фланців роблять строго перпендикулярною осі ізолятора і фланці мають декілька отворів під болти кріплення. Оскільки опорні ізолятори повинні витримувати великі вигинаючі зусилля, діаметр опорних ізоляторів більший, ніж у лінійних.

Стержневі ізолятори випускають на номінальну напругу не більш 110 кВ, штирові ізолятори – на номінальну напругу не більше 35 кВ. При необхідності мати ізолятор на більшу напругу ізолятори збирають в колонку. Проте при цьому зменшується пропорційно числу ізоляторів в колонці мінімальна руйнівна сила на вигин, тоді як момент, що вигинає, росте. Тому на напругу 330 кВ і вище застосовують високовольтні ізоляційні конструкції у вигляді триніг або паралелепіпедів, зібраних із стержневих ізоляторів. Для підвищення механічної міцності триніги мають пояси жорсткості.

3.1.5. Ізоляційні конструкції з газовою ізоляцією

Підвищення тиску газу є одним з шляхів збільшення його електричної міцності. При досить високому тиску електрична міцність газу вище широко вживаних в електротехнічній промисловості трансформаторної оливи і електротехнічного фарфору. Особливо високі розрядні характеристики мають електронегативні гази, у яких великий коефіцієнт прилипання електронів.

Найбільш широке застосування знайшов **елегаз** – шестифториста сірка SF_6 , оскільки він не горючий, має добру теплопровідність, добру дугогасильну здатність, відносно низьку температуру зріджування, не токсичний. Проте продукти його розкладання токсичні і можуть шкідливо впливати на матеріал електродів і тверду ізоляцію.

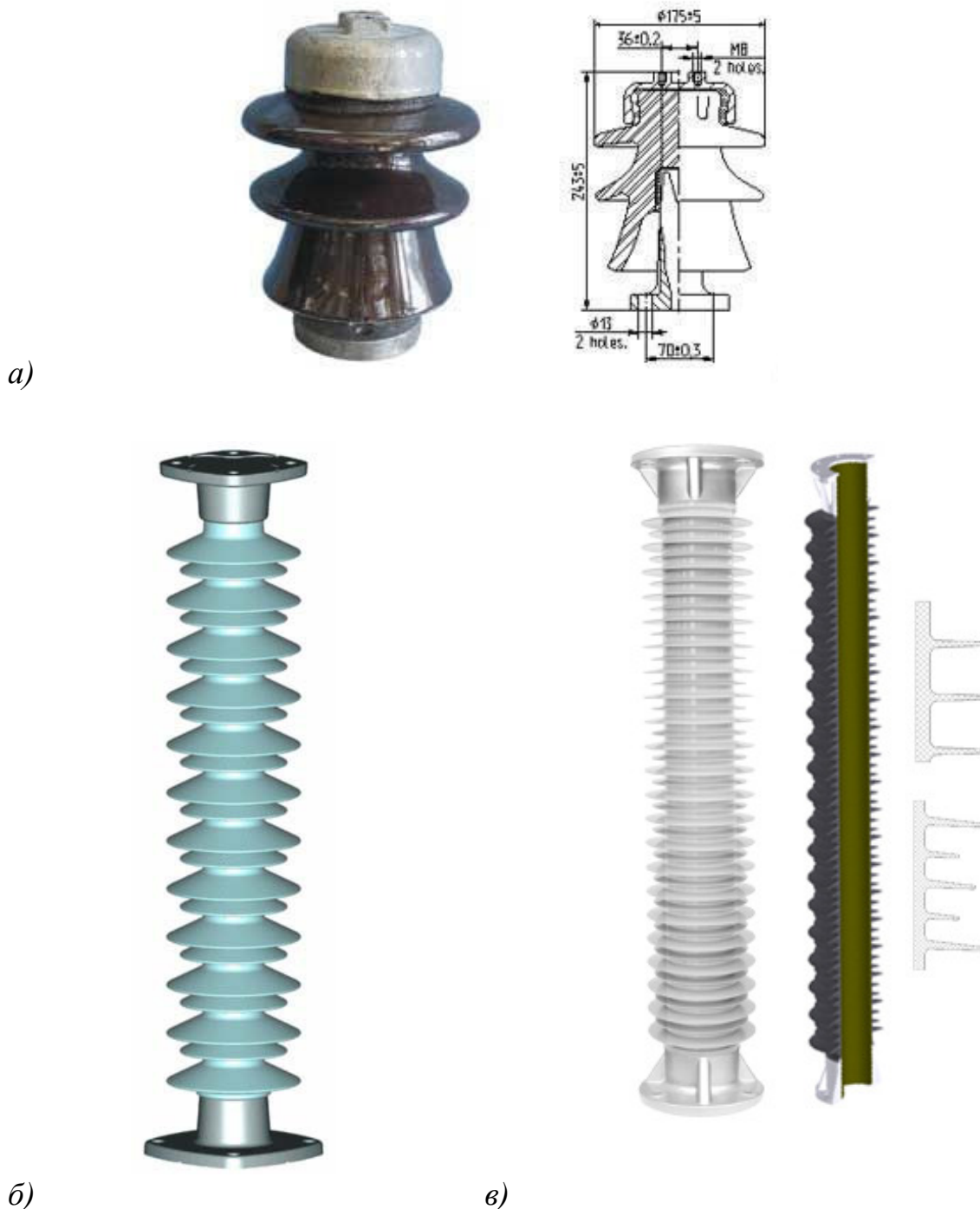


Рис. 3.6. Опорні ізолятори зовнішнього встановлення: *a* – опорний штировий ізолятор ОНШ-15-5; *б* – опорний стержневий кремнійорганічний ізолятор ОСК 10-110-А01-2; *в* – опорний порожнинний полімерний ізолятор

При високих тисках пробивна напруга відносно довгих елегазових проміжків, отримана при плавному підйомі напруги промислової частоти і при імпульсній напрузі, приблизно однакові.

В якості ізоляції елегаз при підвищеному тиску знаходить застосування як в електрофізичних, так і в електроенергетичних установках. Все ширше застосовують герметизовані розподільні пристрої, які мають ряд важливих переваг перед відкритими розподільчими пристроями (рис. 3.7). По-перше, усі елементи, що знаходяться під напругою, розташовані всередині заземленого корпусу, що підвищує безпеку роботи обслуговуючого персоналу і істотно зменшує розміри розподільного пристрою, по-друге, герметизовані розподільчі пристрої можуть бути встановлені в підвалах будівель або спеціальних приміщеннях під землею, що особливо важливо при будівництві або розширенні розподільних пристроїв в межах міста, оскільки у великих містах важко відшукати вільну площу під відкриту підстанцію. Крім того, відкриті розподільчі пристрої порушують архітектурний ансамбль міста, створюють підвищені радіоперешкоди, тоді як герметизовані працюють практично безшумно і не створюють радіоперешкод. По-третє, ізоляція в герметизованих пристроях безпосередньо не контактує з атмосферою і тому надійність її роботи не залежить від погодних умов і забрудненості атмосфери.



Рис. 3.7. Комплексний елегазовий розподільчий пристрій 110 кВ серії ZFW-126, являє собою єдиний технологічний комплекс із стандартизованих функціональних модулів: вимикач, шини, роз'єднувач, заземлюючий роз'єднувач, лінійний роз'єднувач, заземлюючий роз'єднувач, швидкодіючий заземлюючий роз'єднувач, трансформатори струму, трансформатори напруги, обмежувачі перенапруг, повітряне/кабельне введення тощо, а також системи управління і контролю

Герметизовані розподільчі пристрої збирають з окремих однофазних або трифазних комірок (рис. 3.8). Комірки збирають з окремих функціональних модулів: введення, роз'єднувача із заземлювачем, шин, трансформаторів напруги, вимикача з трансформатором струму. Пристрої Модулі забезпечені спеціальною арматурою для заповнення газом і приладами контролю тиску.

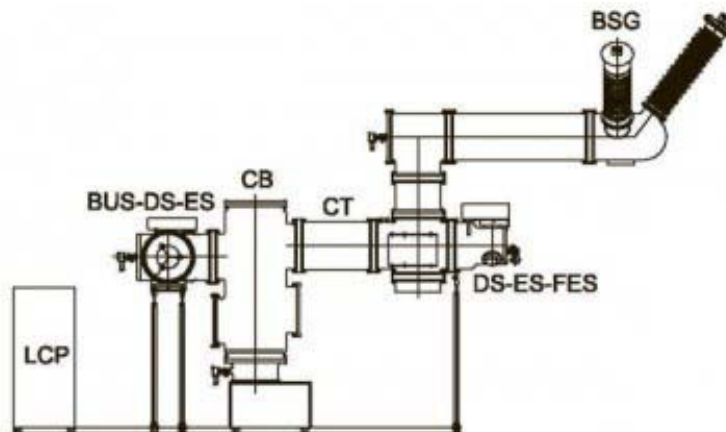


Рис. 3.8. Структурна схема типової комірки комплектного елегазового розподільчого пристрою: CB – автоматичний вимикач, CT – трансформатор струму, BSG – ізолятори вводу-виводу, BUS-DS-ES – шина / роз'єднувач / заземлювач, DS-ES-FES – роз'єднувач / заземлювач / швидкодіючий заземлювач, LCP – панель управління і контролю

Для отримання високої розрядної напруги газового проміжку конструкція елементів ГРУ має бути такою, щоб електричне поле між електродами було близьким до однорідного. Для цієї мети сполучні шини виконують у вигляді коаксіальних співвісних циліндрів.

У герметизованих розподільчих пристроях положення внутрішнього електроду фіксується усередині заземленого циліндра за допомогою ізоляторів-розпірок, що зазвичай виготовляються з епоксидного компаунда.

Зазвичай в установках з елегазовою ізоляцією її електрична міцність близька до тривалої електричної міцності матеріалу ізоляторів, тому особливу увагу приділяють питанню зниження нерівномірності розподілу електричного поля і строгому дотриманню технології виготовлення ізоляторів. Якість виготовлення конструкції оцінюють по рівню часткових розрядів.

Оскільки герметизовані розподільчі пристрої можуть встановлюватися поза закритим приміщенням, апарат має бути розрахований на роботу при температурі до -50°C . При такій температурі вже при тиску газу 0,4 МПа відбувається зріджування SF_6 , що призводить до зниження розрядних характеристик конструкції, тому робочий тиск приймають близько 0,25 МПа.

Конструкція і матеріал ізоляторів вибираються такими, щоб після двадцяти років експлуатації електрична міцність твердої ізоляції була вища газової.

3.1.6. Питання для самоперевірки

1. Що розуміють під координацією ізоляції?
2. Критично проаналізувати атмосферне повітря як основну ізоляцію повітряних ліній?
3. Розкрити конструктивні особливості лінійних ізоляторів.
4. З яких матеріалів виготовляють лінійні ізолятори?
5. З яких елементів складається зовнішня ізоляція підстанції?
6. Які ізоляційні конструкції з газовою ізоляцією Вам відомі?
7. Описати улаштування комплектного елегазового розподільчого пристрою.

3.2. Ізоляція силових трансформаторів, силові конденсатори

Загальні відомості про ізоляцію силових трансформаторів. Конструкція ізоляції трансформаторів. Експлуатація ізоляції трансформаторів. Конструкція силових конденсаторів. Ізоляція силових конденсаторів.

3.2.1. Загальні відомості про ізоляцію силових трансформаторів

Ізоляція силових трансформаторів є складною системою, що складається з різних як за значенням, так і конструкції елементів і вузлів. Розрізняють внутрішню та зовнішню ізоляцію трансформатора.

До зовнішньої ізоляції відноситься, наприклад, ізоляція покриттів введень, дотична до атмосфери (рис. 3.9), повітряні ізоляційні проміжки між введеннями цієї обмотки, між введеннями різних обмоток і до заземлених частин.

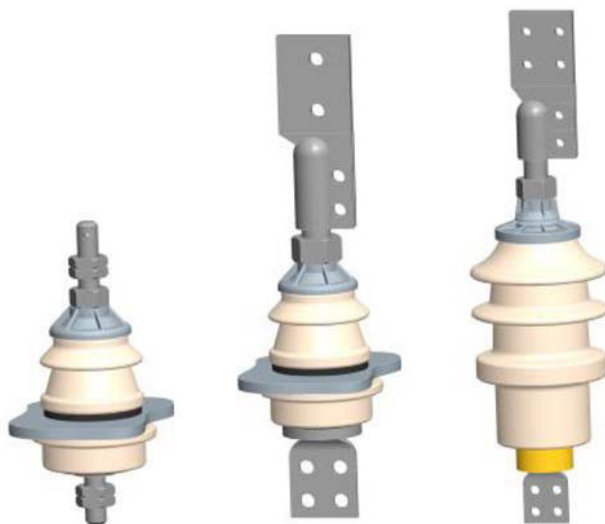


Рис. 3.9. Введення ВП, ВСТ для трансформаторів 0,5 – 35 кВ, 100 – 4000 А

Внутрішня (оливонаповнена, газова, лита) ізоляція трансформатора розділяється на головну і подовжню ізоляцію обмоток, ізоляцію установки введень, ізоляцію відведень, перемикачів тощо.

Головна ізоляція обмоток – це ізоляція від цієї обмотки до заземлених частин магнітопроводу, бака і інших обмоток (у тому числі і інших фаз), рис. 3.10.

Подовжня ізоляція – це ізоляція між різними точками однієї обмотки: між витками, шарами, котушками.

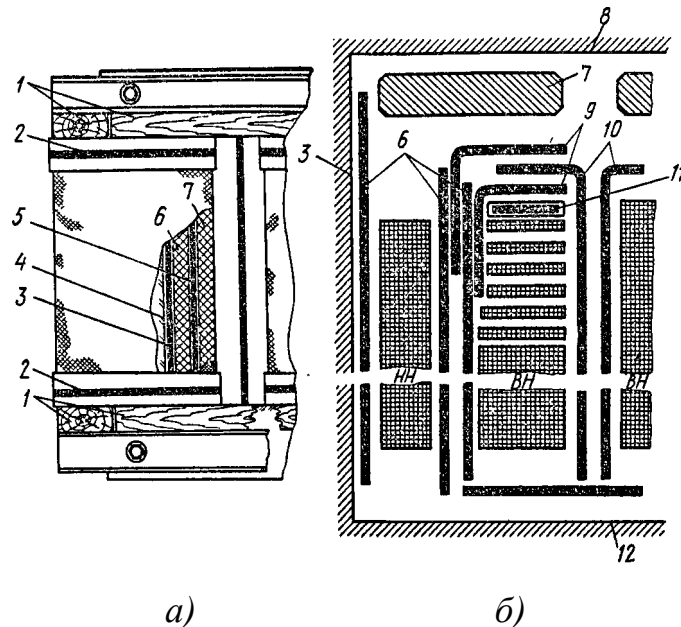


Рис. 3.10. Розташування головної ізоляції обмоток трансформаторів класів напруги: *а* – 35 кВ, *б* – 110 кВ; 1 – зрівняльна ізоляція, 2 – ярмова ізоляція, 3 – стержень магнітопроводу, 4 – ізоляційний циліндр обмотки НН, 5 – ізоляційний циліндр обмотки ВН, 6 – обмотки НН і ВН, 7 – пресувальне кільце, 8 і 12 – верхнє і нижнє ярма, 9 – кутові шайби, 10 – міжфазні перегородки, 11 – ємнісне кільце

У внутрішній оливнонаповненій ізоляції трансформаторів застосовується:

- суцільна тверда (як правило, целюлозна) ізоляція. Це ізоляція між розташованими впритул ізольованими провідниками, витками або відведеннями;

- оливна: у ряді випадків це проміжки між обмоткою і баком, екраном введення і баком, між відведенням і стінкою бака;

- комбінована (оливобар'єрна) ізоляція: оливні проміжки, розділені бар'єрами;

- міжобмоткова ізоляція, ізоляція між фазами, між обмоткою і магнітопроводом тощо.

Ізоляція трансформаторів в процесі експлуатації піддається необмежено тривалій дії робочої напруги і короточасним перенапругам: грозовим (імпульси, тривалістю від одиниць до десятків мікросекунд); комутаційним (імпульси з великим згасанням, тривалістю до декількох тисяч мікросекунд) і квазістаціонарним (підвищення напруги робочої частоти, тривалістю до декількох годин). Координація внутрішньої ізоляції трансформатора вимагає забезпечення електричної міцності в усіх цих режимах.

Перевірка виконання вимог координації здійснюється шляхом високовольтних випробувань, в систему яких входить наступний комплекс впливів:

- одинхвилинна випробувальна напруга промислової частоти;
- тривала (одногодинна) випробувальна напруга промислової частоти з виміром інтенсивності часткових розрядів, що дорівнює 130-150% робочої напруги;
- комутаційний імпульс з фронтом не менше 100 мкс і тривалістю не менше 1000 мкс;
- повний грозовий імпульс, з фронтом 1,2 мкс і тривалістю 50 мкс.

3.2.2. Конструкція ізоляції трансформаторів

У сучасних силових трансформаторах в якості головної використовується переважно олиобар'єрна ізоляція. Поздовжня ізоляція виконується паперово-оливною або за допомогою ізолювання і покриття витків і котушок обмотки

Олиобар'єрна ізоляція має досить високу короточасну електричну міцність і дозволяє інтенсивно охолоджувати конструкцію за рахунок циркуляції оливи. Для того, щоб бар'єри були ефективними, вони повинні розташовуватися перпендикулярно силовим лініям електричного поля. У прохідних ізоляторах, де електричне поле в основному радіальне, це без зусиль досягається шляхом застосування циліндричних бар'єрів. У трансформаторах електричне поле має складну конфігурацію, тому доводиться застосовувати комбінацію бар'єрів різної форми (циліндричний бар'єр, плоска шайба, кутова шайба). Кількість бар'єрів залежить від номінальної напруги.

У ізоляції між шарами і між котушками роль покриття грають власна паперова ізоляція обмотувальних дротів або додатково накладені шари паперових стрічок.

Конструкція ізоляції трансформаторів виконується по-різному залежно від потужності, класу напруги, способу регулювання напруги і ряду інших специфічних особливостей. Проте для більшості трансформаторів типові конструктивні елементи ізоляції однакові.

На прикладі трансформатора потужністю 1600 кВА (рис. 3.11) розглянемо основні деталі ізоляції: циліндри, рейки, дистанційні прокладки, шайби, опорні кільця.

Основне призначення ізоляційних циліндрів 7 і 19 – створення ізоляційного бар'єру між обмотками або між обмотками і магнітопроводом. Циліндр може бути жорстким (паперово-бакелітовим), виконуючи функцію каркасу обмотки, або м'яким з листів електроізоляційного картону, які намотуються на стержень або насаджуються на стержень обмотку в процесі збирання трансформатора. Рейки 6, 20 мають подвійне призначення: вони утворюють вертикальні канали між циліндром і витками обмотки, на них розміщені дистанційні прокладки.

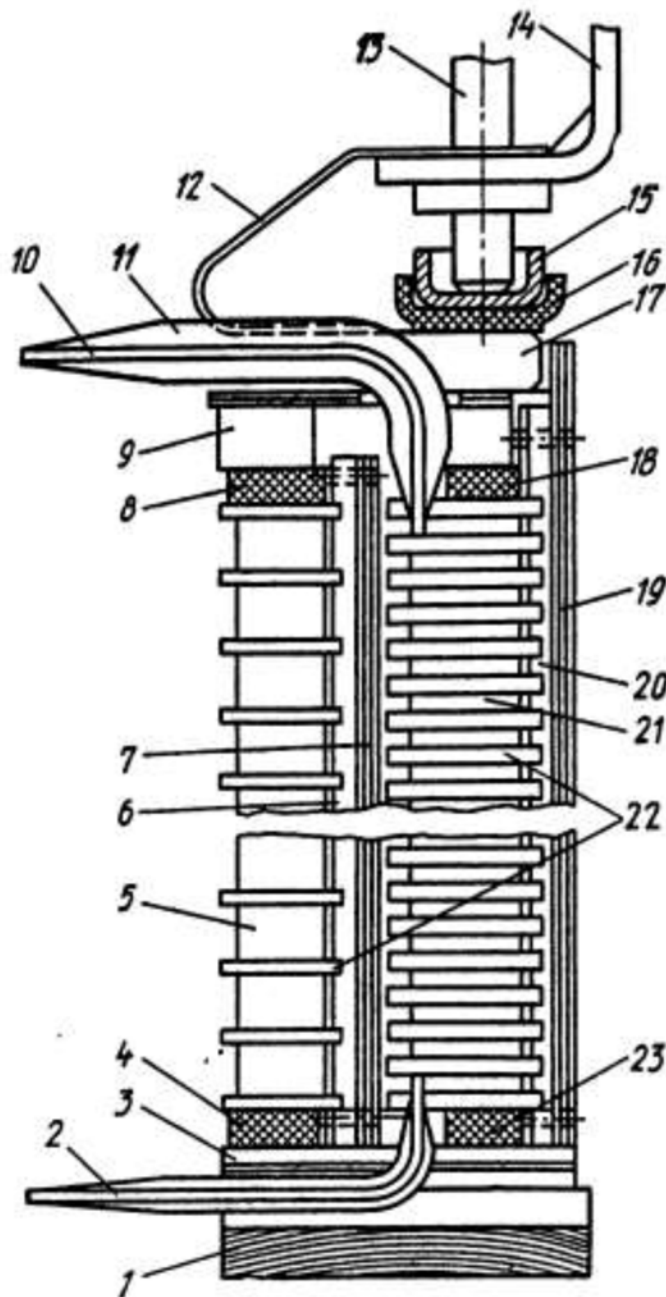


Рис. 3.11. Розміщення обмоток та ізоляції трансформатора 1600 кВА класу напруги 35 кВ: 1 – зрівнювальна ізоляція; 2, 10 – нижній і верхній відводи обмотки НН; 3, 9 – нижня і верхня ярмова ізоляція; 4, 8 – нижнє і верхнє опорні кільця обмотки ВН; 5, 21 – обмотки ВН і НН; 6 – опорний клин (рейка) обмотки ВН; 7, 19 – циліндри; 11 – паперова ізоляція верхнього відводу НН; 12 – стрічка заземлююча пресувального кільця; 13 – пресувальний гвинт; 14 – ярмова балка; 15, 16 – сталевий і ізолюючий стакани; 17 – пресувальне кільце; 18, 23 – верхнє і нижнє опорні кільця обмотки НН; 20 – клин (рейка); 22 – прокладки між котушками

Дистанційні прокладення використовуються для створення горизонтальних каналів між витками або котушками обмотки. Прокладки створюють опорну поверхню, через яку передаються осьові зусилля, що впливають на обмотки трансформатора. Вони сприймають значне механічне навантаження, особливо при коротких замиканнях. Кожна прокладка набирається з декількох пластин завтовшки 0,5-3,0 мм до потрібної товщини. Щоб зв'язати рейки з прокладками, в котушкових прокладках проштамповують просічення. Цими просіченнями прокладки надіваються на крайню широку смугу рейки при намотуванні або збиранні обмотки на стержень. Широко застосовують прокладки з двома просіченнями, що дозволяють виконати додаткове кріплення прокладок зовнішніми рейками ("прошивку" обмоток).

Шайби застосовують в обмотках як деталі кінцевої ізоляції або замість прокладок між котушками. Кінцева ізоляція обмоток – один з елементів головної ізоляції – служить для ізоляції торцевих частин обмоток від ярма, ярмових балок і сталевих пресуючих кілець. У кінцеву ізоляцію входить зрівняльна і ярмова ізоляція.

3.2.3. Експлуатація ізоляції трансформаторів

Для тривалої і надійної роботи трансформаторів вимагається дотримання встановлених температурних режимів і рівня напруги, суворе дотримання норм якості оливи, утримання зміст в справному стані пристроїв охолодження, регулювання напруги під навантаженням і інших пристроїв. Всі ці основні вимоги спрямовані в першу чергу на збереження ізоляції трансформатора.

Недотримання теплового режиму при експлуатації трансформатора веде до швидкого зносу його ізоляції. Чим вище температура ізоляції обмоток, при якій вона працює, тим швидше вона втрачає свої ізоляційні і механічні властивості. Трансформаторна олива, що служить ізоляцією і охолоджувальним середовищем, під впливом високих температур окислюється, при цьому утворюється шлам, який порушує циркуляцію оливи і тим самим погіршує охолодження трансформатора. Тому під час експлуатації ведеться строгий нагляд за температурним режимом роботи трансформаторів і за технічним станом пристроїв охолодження трансформаторів.

Максимальне значення температури верхніх шарів оливи нормоване: для трансформаторів з природним оливним охолодженням +95 °С, для трансформаторів з оливо-повітряним охолодженням +80 °С і для трансформаторів з оливо-водяним охолодженням +70 °С.

Дотримання рівня напруги при експлуатації трансформаторів також в першу чергу спрямовано на збереження електричних властивостей його ізоляції. Підвищення напруги викликає появу вищих гармонік у формі кривої напруги, що може виявитися небезпечним для ізоляції трансформатора. Крім того, підвищення напруги збільшує індукцію в магнітопроводі і втрати на намагнічення. Зростання втрат може привести до місцевих перегрівань пакетів сталі магнітопроводу і ушкодженню ізоляції між листами. Виникає так звана "пожежа заліза" в трансформаторі. Тому тривале підвищення напруги не повинне перевищувати 5% номінального. Напруга на трансформаторі не

повинна також перевищувати значення найбільшої робочої напруги для цієї номінальної напруги. Контроль напруги здійснюється вольтметрами на низькій стороні трансформаторів напруги, включених на збірні шини або безпосередньо на виводи трансформатора.

Окрім контролю температури і рівня напруги в процесі експлуатації трансформаторів ведеться систематичний нагляд за станом їх ізоляції за допомогою періодичних оглядів і профілактичних випробувань.

Періодичні огляди трансформаторів без відключення здійснюються в установках з постійним чергуванням персоналу 1 раз на добу, в установках без постійного чергування персоналу – не рідше за 1 раз протягом 1 місяця, а в трансформаторних пунктах – не рідше за 1 рази протягом 6 місяців. При оглядах перевіряються: температура трансформатора за показами манометричного або ртутного термометрів, встановлених на трансформаторах; цілість і забруднення фарфорових покришок введень; відсутність течі оливи з баку і введень трансформатора; цілість мембрани вихлопної труби; справність системи охолодження трансформатора.

Профілактичним випробуванням трансформатори піддаються при введенні в експлуатацію, при капітальних і поточних ремонтах. Здійснюються також періодичні (міжремонтні) випробування. Систематичний нагляд за експлуатацією ізоляції трансформаторів забезпечує довголітню і надійну їх роботу.

3.2.4. Конструкція силових конденсаторів

Силові конденсатори використовуються в установках змінного струму для підвищення коефіцієнта потужності ("косинусні" конденсатори), для подовжньої компенсації в далеких лініях електропередачі, для приєднання до повітряних ліній апаратури високочастотного зв'язку (конденсатори зв'язку), для відбору від ліній високої напруги невеликої потужності і для інших цілей. В установках постійного струму силові конденсатори працюють в схемах з інверторами. У лабораторних генераторах імпульсної напруги і струмів, а також в спеціальних установках для отримання сильних магнітних полів, високотемпературної плазми, електрогідралічного ефекту тощо використовуються імпульсні силові конденсатори.

В усіх випадках силові конденсатори виконують свої функції за рахунок того, що в активній частині їх ізоляції, тобто в ізоляції, ув'язненій між електродами, в деякі моменти часу накопичується енергія, яка потім використовується для різних цілей (рис. 3.12). Енергія, що накопичується в конденсаторі, дорівнює:

$$W = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r E_p^2 V_a}{2}, \quad (3.1)$$

де V_a – об'єм активної частини ізоляції; E_p – робоча напруженість в ізоляції.

Повний об'єм конденсатора V приблизно пропорційний V_a , тому $V = k / (\epsilon_r E_p^2)$. Отже, в силових конденсаторах доцільно використовувати

ізоляцію, що має високу відносну діелектричну проникність ε_r і високу тривалу електричну міцність, від якої передусім залежить значення робочої напруги E_p .



Рис. 3.12. Батарея статичний конденсаторів для підвищення коефіцієнта потужності мережі

Тривало допустима напруги в ізоляції обмежується також діелектричними втратами, які є єдиним джерелом тепла в конденсаторах. У зв'язку з цим конденсаторна ізоляція повинна мати малі діелектричні втрати, тобто низькі значення $\tan \delta$.

Конструкцію силового конденсатора для підвищення коефіцієнта потужності схематично ілюструє рис. 3.13. У герметизованому корпусі розташовані плоскопресовані рулонні секції, стягнуті в пакет між металевими щокми за допомогою хомутів. Між секціями встановлені ізолюючі прокладення з електрокартону. Ізоляція від корпусу виконана з електрокартону або кабельного паперу. Внутрішній об'єм конденсатора заповнений просочуючою речовиною. Залежно від номінальної напруги конденсатора і його ємності секції з'єднуються перемичками в паралельну, послідовну або комбіновану схему. У конденсаторах деяких типів секції підключаються через індивідуальні запобіжники. При цьому працездатність конденсатора зберігається навіть після пробою декількох секцій.

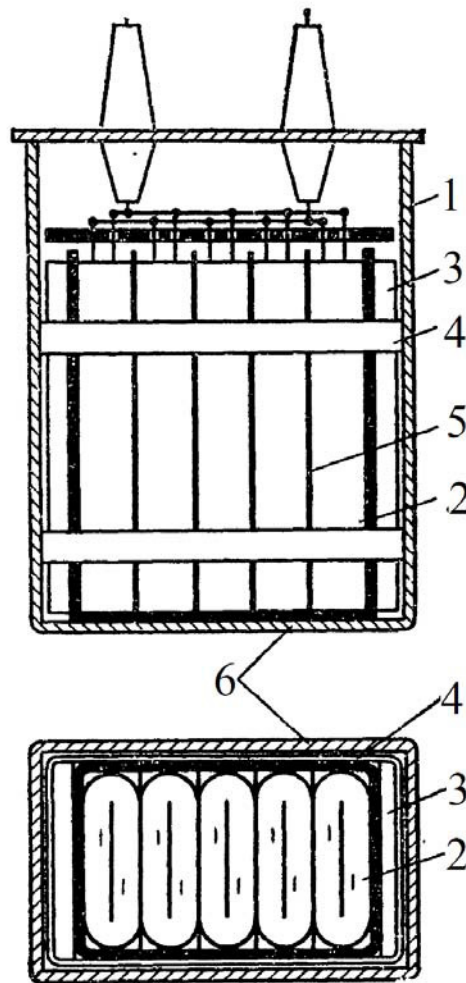


Рис. 3.13. Схематична конструкція силового конденсатора для підвищення коефіцієнта потужності: 1 – герметизований корпус; 2 – рулонні секції; 3 – металічні щокми; 4 – хомут; 5 – ізолююча прокладка; 6 – ізоляція від корпусу

В якості прикладу розглянемо силові оливонаповнені конденсатори МКК DCI від EPCOS, які компанія TDK-EPC поставляє для високошвидкісних потягів Velaro, що виробляє концерн Siemens за замовленням уряду Китаю (рис. 3.14). Конденсатори використовуються в резонансних фільтрах тягових перетворювачів. Кожен такий конденсатор має ємність 1520 мкФ і розрахований на робочу постійну напругу 4135 В.

Силові конденсатори виготовлені на основі структурованої плівки з сегментованою металізацією. Один силовий конденсатор включає приблизно 10000 секцій, з'єднаних паралельно і послідовно. Конденсаторні секції зібрані в пачки.

Такий принцип побудови конденсатора дозволяє йому самовідновлюватися і навіть великі перевантаження не є критичними. У разі короткого замикання в одній з секцій в місці пробоя металізація випаровується до тих пір, поки не зупиниться процес короткого замикання. Якщо ж струм продовжує наростати, то діелектрик (плівка) повністю сплавляється, і індивідуальний конденсатор стає високорезистивним, тим самим запобігаючи подальшому нагріву і пробоя конденсатора в інших точках.

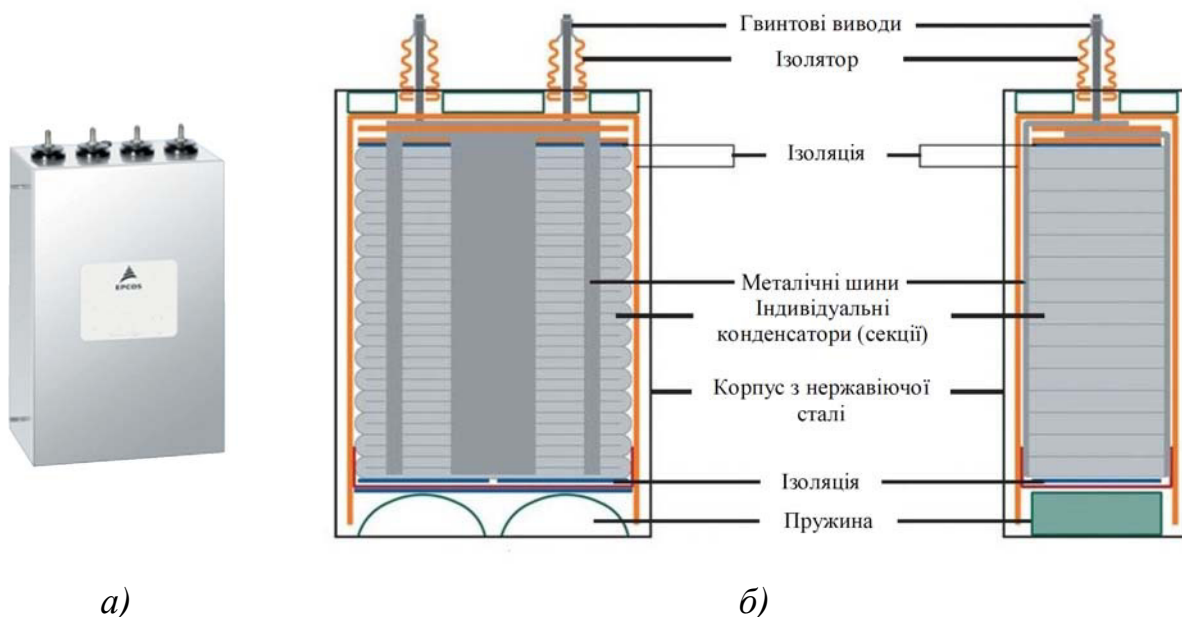


Рис. 3.14. Силовий оливонаповнений конденсатор МКК DCI від EPCOS:
а – загальний вигляд; *б* – конструкція

Конденсатори МКК DCI заповнюються рапсовою олією. У поєднанні з оливним заповненням діелектрик конденсатора витримує напруженість поля до 240 В/мкм і, отже, забезпечує високу щільність енергії, що дозволяє досягти дуже компактних розмірів (450×165×580 мм). Конденсатор виготовляється в зварному корпусі з нержавіючої сталі.

3.2.5. Ізоляція силових конденсаторів

Секція конденсатора є спіральним намотаним рулоном зі стрічок діелектрика і алюмінієвої фольги, що виконує роль електродів. У рулонних секціях обидві поверхні електродів є активними, внаслідок чого скорочується витрата металу на електроди.

Конденсатори різного призначення, різної номінальної напруги і реактивної потужності принципово влаштовані однаково, тобто складаються з пакетів секцій, сполучених за тією або іншою схемою і розташованих в герметизованому корпусі, залитому просочувальною речовиною. Відрізняються конденсатори розмірами, числом і схемою з'єднання секцій, числом пакетів і конструкцією корпусу. У одному корпусі можуть знаходитися секції, що утворюють ємності усіх трьох фаз, згруповані в декілька пакетів. Іноді корпусом конденсатора є фарфоровий або бакелітовий циліндр з торцевими металевими виводами-фланцями. Пакети в цьому випадку розташовуються вертикально. Конструкція корпусу, розміри і компонування секцій великою мірою залежать від умов охолодження. В силових конденсаторах використовується паперово-оливна ізоляція. Вона виготовляється із спеціальних сортів паперів зі щільністю 0,8-1,3 г/см³ і завтовшки 6-30 мкм.

Частіше всього використовуються папери завтовшки 10-15 мкм. Ізоляція секції виконується з шести – восьми шарів паперу, тобто загальна товщина

ізоляції між електродами складає 60-120 мкм. При меншому числі шарів суттєво зменшується короткочасна електрична міцність, а при більшій товщині знижується короткочасна і особливо тривала електрична міцність, оскільки зменшується напруженість виникнення початкових часткових розрядів. Для просочення конденсаторної ізоляції використовуються спеціальні газостійкі мінеральні оливи і синтетичні рідини на основі хлордифенілу. Останні є полярними рідинами і мають діелектричну проникність 4,8-5,5 замість 2,1-2,2 у мінеральних оливах. Для конденсаторної паперової ізоляції, у якої до 30% об'єму займають пори між волокнами і вузькі щілини між шарами паперів, діелектрична проникність просочуючої рідини має дуже велике значення. При просоченні хлорованими рідинами еквівалентна діелектрична проникність ізоляції виходить приблизно в 1,5 рази більша, ніж при просоченні мінеральною оливою. Крім того, електричне поле більш рівномірно розподіляється між шарами паперу і прошарками просочуючого складу, завдяки чому підвищується короткочасна і тривала електрична міцність і виявляється можливим підвищити робочі напруженості. У результаті силові конденсатори, просочені хлорованими рідинами, мають при одній і тій же реактивній потужності в 2-3 рази менший об'єм, ніж конденсатори з мінеральною оливою.

Синтетичні рідини мають і недоліки. Передусім вони, як і усі полярні рідини, дуже чутливі до забруднень. Невеликі забруднення викликають різке збільшення провідності і діелектричних втрат і небезпеку теплового пробою. У зв'язку з цим хлоровані рідини вимагають особливо ретельного очищення перед заливкою і відмінкової герметизації корпусів конденсаторів. Важливий недолік їх – токсичність. Тому вони вимагають спеціальних заходів безпеки при виготовленні конденсаторів.

3.2.6. Питання для самоперевірки

1. З яких елементів складається ізоляція силових трансформаторів?
2. Як розташовується головна ізоляція обмоток трансформаторів різних класів напруги?
3. Яким чином перевіряється виконання вимог координації ізоляції силових трансформаторів?
4. Описати улаштування оливобар'єрної ізоляції силового трансформатора?
5. Назвати основні експлуатаційні вимоги до ізоляції трансформаторів.
6. Розкрити конструкцію силових конденсаторів.
7. Які матеріали та конструктивні рішення забезпечують ізоляцію силових конденсаторів?

3.3. Силові електричні кабелі, ізоляція електричних машин високої напруги

Загальна характеристика силових кабелів. Основні конструкції кабелів високої напруги. Випробування ізоляції кабелів. Ізоляція електричних машин високої напруги. Випробування ізоляції електричних машин

3.3.1. Загальна характеристика силових кабелів

Електричні кабелі – це гнучкі ізольовані провідники, забезпечені захисними оболонками, які оберігають ізоляцію від зовнішніх механічних і інших впливів. Основними елементами силових кабелів є провідники (жили), ізоляція по відношенню до землі і між жилами, герметична металева оболонка і захисні покрити.

Металева оболонка, що виконується зазвичай зі свинцю або алюмінію, оберігає ізоляцію головним чином від вологи і частково від механічних ушкоджень. Захисні покрити включають броню із сталевих дротів або стрічок і шари кабельної пряжі з джутового волокна, просоченої бітумінозними сполуками з антисептиками. Броня забезпечує головний захист оболонки кабелю і його ізоляції від зовнішніх механічних впливів, а джутові покрити – захист оболонки від корозії.

Кабелі повинні мати достатню гнучкість, щоб їх можна було намотувати на барабани для транспортування або зберігання і згинати при укладанні по нерівній трасі. Тому жили силових кабелів виконуються з великого числа скручених тонких дротів.

У кабелях ізоляція сприймає на себе масу струмопровідних жил, а також значні зусилля, необхідні для вигинання жил при намотуванні на барабан або при прокладенні. У зв'язку з цим ізоляція кабелів має характеризуватися достатньою гнучкістю та високою механічною міцністю.

Звичайна для ізоляції устаткування високої напруги вимога високої електричної міцності стосовно силових кабелів має особливе значення. Річ у тому, що при збільшенні електричної міцності і відповідно при зменшенні товщини ізоляції не лише знижуються витрати на її виготовлення, але і покращуються умови відведення тепла від жили і збільшуються допустимі робочі струми, кабель стає більш гнучким, досягається економія металу оболонки і покривних матеріалів.

До надійності кабельних ліній і, отже, до їх ізоляції пред'являються підвищені вимоги, оскільки на відшукування місця ушкодження і особливо на його усунення в підземних лініях витрачається багато часу і засобів. При цьому слід мати на увазі, що кабельні лінії виконуються зазвичай з декількох відрізків обмеженої довжини (будівельна довжина – від 250 м до 750 м), що з'єднуються послідовно муфтами. Останні монтуються в польових умовах, тому технологія накладення в них ізоляції значно поступається заводській.

Нині в силових кабелях високої напруги переважно використовується паперово-оливна ізоляція, проте застосовуються і інші види ізоляції.

3.3.2. Основні конструкції кабелів високої напруги

Для напруги до 35 кВ найбільше застосування отримали кабелі з в'язким просоченням, у яких стрічкова паперова ізоляція просочується оливоканіфольними або синтетичними сполуками підвищеної в'язкості, які не розтікаються.

Кабелі з нестікаючими сполуками можуть прокладатися з різницею рівнів до 300 м. При цьому не виникає небезпеки стікання просочуючої речовини в нижню частину кабелю і утворення в його верхній частині великих об'ємів збіднено просоченої ізоляції. Основний недолік кабелів з в'язким просоченням полягає в тому, що в їх ізоляції неминуче утворюються газові включення. Одна з причин – циклічні нагріви і охолодження при роботі з навантаженням, що періодично міняється. Після декількох таких циклів при охолодженні оболонка через залишкову деформацію зберігає розміри, відповідні нагрітому стану, а ізоляція зменшується в об'ємі. В результаті в ізоляції утворюються порожнини, які поступово заповнюються газами, що виділяються з ізоляції. Наявність газових включень знижує тривалу електричну міцність ізоляції. Внаслідок цього в кабелях з в'язким просоченням робочі напруженості мають відносно невисокі значення.

Такі кабелі випускаються декількох типів з однією, двома, трьома і чотирма жилами. В якості прикладу на рис. 3.15 показаний трижильний кабель з поясною ізоляцією і секторними жилами. Як видно з рисунка, для зменшення зовнішнього діаметру кабелю жилам надається не кругла, а секторна форма. Ізоляція складається з двох частин – фазної і поясної. Таким чином, між жилами кабелю знаходиться подвійна фазна ізоляція, розрахована на лінійну напругу, а між кожною жилою і оболонкою – фазна і поясна. Проміжки між окремими ізольованими жилами (зокрема – в центрі) заповнюються низькоякісною ізоляцією (паперовими джгутами).

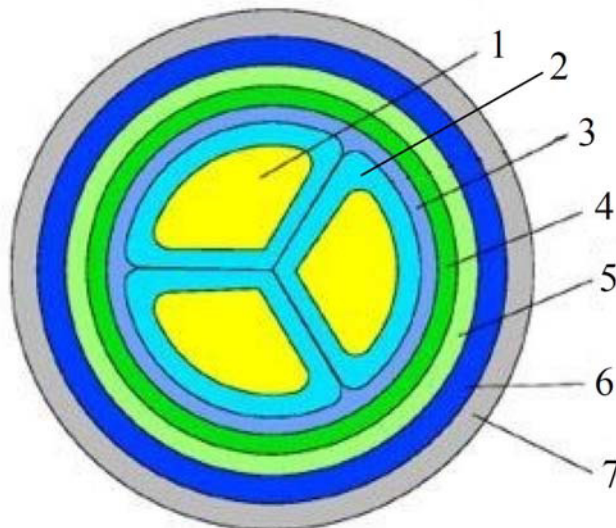


Рис. 3.15. Трижильний кабель з поясною ізоляцією і секторними жилами:
1 – жила; 2 – фазна ізоляція; 3 – поясна ізоляція; 4 – свинцева оболонка; 5 – подушка під бронею зі спеціального паперу або нетканого полотна; 6 – броня зі сталевих стрічок; 7 – зовнішній захисний покрив

Для напруги 110-220 кВ промислової частоти використовуються оливонаповнені кабелі, які, як правило, виконуються одножильними, рис. 3.16. У таких кабелях стрічкова паперова ізоляція просочується малов'язкою оливою, яка може переміщатися усередині жили уздовж кабелю і знаходиться під надлишковим тиском. Завдяки цьому унеможлиблюється поява в ізоляції газових включень при циклічних змінах температури і тривала електрична міцність підвищується в 3 рази і більше в порівнянні з міцністю ізоляції, просоченої в'язкими складами.

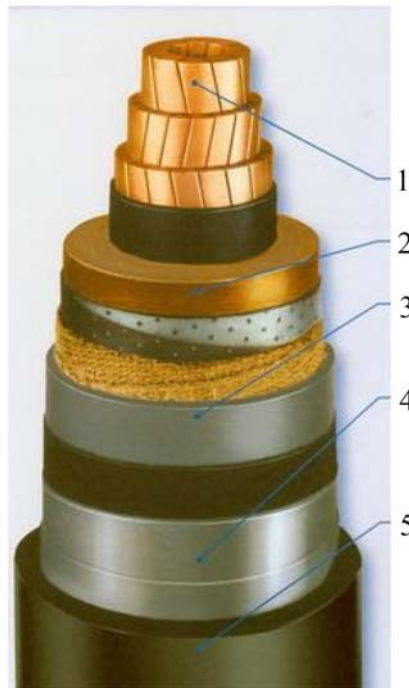


Рис. 3.16. Конструкція силового оливонаповненого кабелю низького тиску в свинцевій або алюмінієвій оболонці на номінальну напругу 110, 150 або 220 кВ:

- 1 – мідна жила з оливопровідним каналом усередині; 2 – паперова ізоляція;
3 – свинцева оболонка; 4 – немагнітна армуюча стрічка;
5 – поліетиленова оболонка

Для підтримування незмінного тиску в кабелі в умовах експлуатації на кабельній лінії через кожні 1-2,5 км встановлюються баки тиску. Усередині герметичного корпусу розташовуються пружні елементи у вигляді порожнистих дисків з хвилястою поверхнею, заповнених повітрям під тиском. При нагріванні кабелю тиск оливи в баку підвищується і частина оливи переміщується в бак тиску (пружні елементи стискаються). При охолодженні олива повертається в кабель (пружні елементи розширюються). Баки тиску приєднуються до кінцевих і до спеціальних стопорних муфт, в яких є канали оливи в ізоляції від заземлених металевих частин до струмопровідної жили.

По тиску оливонаповнені кабелі діляться на кабелі низького (до 0,2 МПа), середнього (0,4-0,5 МПа) і високого тиску. Зі збільшенням тиску оливи електрична міцність росте, проте конструкція зміцнюючих покрів і ущільнень в муфтах ускладнюється.

В оливонаповнених кабелях на напругу 110-220 кВ особлива увага приділяється регулюванню електричних полів. Передусім жила кабелю виконується з дротів спеціального профілю, а не з круглих, як в кабелях на напругу до 35 кВ. За рахунок цього досягається більш гладка поверхня жили. Крім того, жила екранується шарами напівпровідного паперу, завдяки чому усуваються підвищення напруженості у кромках окремих дротів.

При напрузі 110-150 кВ змінного струму найбільше поширення набули оливонаповнені кабелі високого тиску в сталевих трубах. У сталевому трубопроводі, заповненому, малов'язкою оливою під тиском близько 1,5 МПа, розміщуються три круглі жили з ізоляцією, яка просочена в'язкими сполуками. Ізоляція покрита еластичним, герметично щільним шаром (поліетилен тощо), який запобігає контакту ізоляції з оливою в трубі, а також зволоження ізоляції при транспортуванні і монтажі. Еластичне покриття вільно передає ізоляції тиск оливи, що заповнює сталеву трубу.

Перевага кабелів у трубах полягає в тому, що спрощується конструкція оболонки, що сприймає тиск оливи. Проте збільшується об'єм робіт при прокладенні лінії (зварювання сталевих труб, зачистка швів, накладення антикорозійних покриттів тощо) і значно зростає об'єм оливи, що ускладнює систему підтримки надлишкового тиску.

Разом з розглянутими раніше при напрузі до 220 кВ застосовуються газонаповнені кабелі, в яких необхідна тривала електрична міцність досягається за рахунок підвищення тиску газу (сухий очищений азот), рис. 3.17. Ці кабелі мають приблизно таку ж конструкцію, як і оливонаповнені, але в них використовується ізоляція із збідненим просоченням, що свідомо містить газові включення. Проте електрична міцність включень значно підвищується за рахунок того, що створюється підвищений тиск шляхом безпосереднього введення газу в кабель під тиском, або за рахунок прокладення кабелю з еластичною оболонкою в сталевій трубі з газом під тиском. Перевага таких кабелів полягає в тому, що застосовується простіша система забезпечення підвищених тисків за рахунок використання балонів із стислим газом. Крім того, такі кабелі можуть укладатися на трасах з великим ухилом. Проте в газонаповнених кабелях умови охолодження гірше, і це обмежує робочі струми.

Конструкція кабелю з пластмасовою ізоляцією досить проста: струмопровідна жила у кабелів до 3 кВ покривається суцільним шаром поліетилену, а кабелі на напругу 6 кВ і вище мають додатково екрани з напівпровідного поліетилену або полівінілхлориду поверх ізоляції або на ізоляції і на жилі. Наявність таких екранів зменшує вплив повітряних включень, що виникають на межі ізоляції з жилою, і робить електричне поле в ізоляції більш однорідним. Випускають також кабелі із захисними покровами і бронею, як у кабелів з в'язким просоченням.

Переваги пластмасових кабелів в порівнянні з кабелями з в'язким просоченням полягають в тому, що маса їх менше і не вимагається (чи спрощується) система оболонок, що захищають ізоляцію від зовнішніх дій. Проте нагрівостійкість існуючих ізоляційних пластмас істотно нижча, ніж паперовій ізоляції з в'язким просоченням.

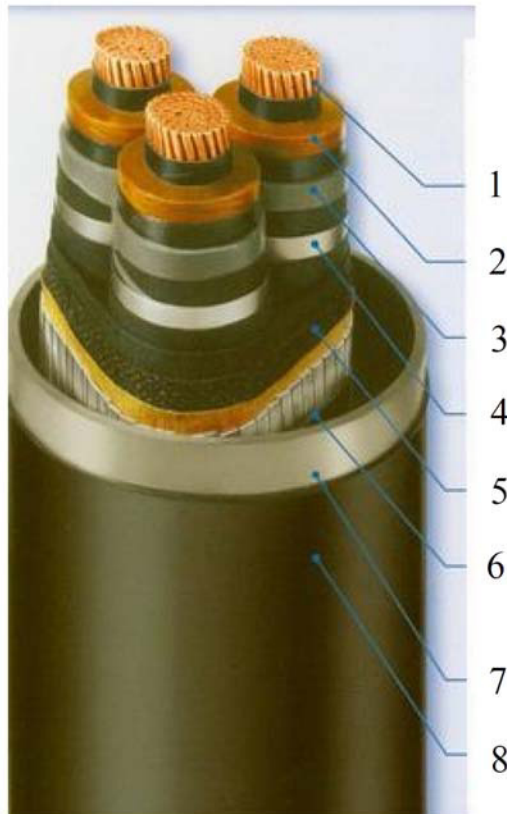


Рис. 3.17. Елементи конструкції силового газонаповненого кабелю 110 кВ зовнішнього тиску: 1 – мідна жила; 2 – паперова ізоляція; 3 – свинцева оболонка; 4 – армуюча стрічка; 5 – складені разом жили; 6 – броня із плаского сталюого дроту; 7 – сталюна труба; 8 – поліетиленове покриття

Кабелі з елегазовою ізоляцією під тиском влаштовані таким чином. У сталевій або алюмінієвій трубі на розпірках з твердого діелектрика закріплена струмопровідна жила (чи три жили). Лінія збирається з відрізків таких труб і заповнюється високоміцним газом – елегазом під тиском, рис. 3.18. Такі кабелі мають ряд переваг: порівняно просту конструкцію, малі діелектричні втрати, характерну для зовнішньої ізоляції здатність до відновлення електричної міцності після випадкового пробою, малу ємність на одиницю довжини. Розрахунки показують, що такі кабелі особливо ефективні при надвисоких напругах і можуть виявитися економічно вигіднішими, ніж повітряні лінії електропередачі.

3.3.3. Випробування ізоляції кабелів

Рівні ізоляції кабелів задаються їх випробувальною напругою. Випробувальна напруга встановлюється виходячи з умови забезпечення надійної роботи кабелів при внутрішніх і грозових перенапругах.

На заводі ізоляція кабелів з малов'язким просоченням і оливнонаповнених кабелів випробовується змінною напругою промислової частоти. Випробувальна напруга складає близько $2,5U_{ном}$. Кабелі зі збідненою ізоляцією або з газовим просоченням для запобігання ушкодженню їх ізоляції при випробуваннях випробовуються постійною напругою $(3,5 \div 4)U_{ном}$, причому

для кабелів до 35 кВ включно значення випробувальної напруги встановлюється по відношенню до лінійної напруги, а для кабелів 110 кВ і вище – по відношенню до фазної напруги. Тривалість випробувань знаходиться в межах 10-12 хв.



Рис. 3.18. Лінії електропередачі з газовою ізоляцією

Кабелі вищих класів напруги (110 кВ і вище) в окремих випадках при типових випробуваннях піддаються імпульсним випробуванням. Повний стандартний імпульс встановлюється при цьому на рівні $(4 \div 5) U_{ном}$. Випробувальна напруга прикладається по черзі до кожної жили. При цьому оболонка і інші жили заземляються.

Під час заводських випробувань у кабелів на напругу до 6 кВ вимірюється опір ізоляції, а у кабелів 6 кВ і вище, крім того, вимірюються $\tan \delta$ і його приріст $\Delta \tan \delta$ при збільшенні напруги від $0,5 U_{ном}$ до $2,0 U_{ном}$. Гранично допустимі значення опору ізоляції, $\tan \delta$ і $\Delta \tan \delta$ нормуються.

3.3.4. Ізоляція електричних машин високої напруги

До електричних машин високої напруги відносяться турбо- та гідрогенератори, синхронні компенсатори і двигуни великої потужності з номінальною напругою 3 кВ і вище. Як джерела енергії або приводи великих агрегатів вони виконують виключно важливі функції в енергосистемах і на промислових підприємствах, тому до машин високої напруги в цілому і до їх ізоляції зокрема пред'являються дуже високі вимоги відносно надійності і термінів служби.

Активні матеріали, тобто мідь обмотки і сталь статора, працюють в електричних машинах при великих питомих навантаженнях (щільності струму, індукціях). Відповідно втрати в одиниці об'єму цих матеріалів є високими, і для ефективного відведення тепла, що виділяється, вимагаються великі перепади температур активних частин над температурою середовища, що охолоджує.

Остання для охолоджуючого газоподібного середовища становить $+40^{\circ}\text{C}$. При поверхневому (непрямому) охолодженні обмотки, коли тепло від міді відводиться через ізоляцію, усе це обумовлює необхідність високих допустимих температур і високої теплопровідності ізоляції. У разі внутрішнього (безпосереднього) охолодження, що здійснюється за рахунок примусової циркуляції газу або рідини (води, оливи) по вбудованих в обмотку порожнистих провідниках, вимоги до теплопровідності знижуються. У зв'язку із сказаним в обертових машинах високої напруги використовується ізоляція, що відноситься по нагрівостійкості до класів В, F і Н.

У електричних машинах ізоляція працює в умовах постійної вібрації, особливо сильної на лобових частинах обмотки. Крім того, вона епізодично піддається ударним механічним діям, що виникають при проходженні по обмотці великих струмів під час зовнішніх коротких замикань, при включенні в мережу в режимі самосинхронізації тощо.

Найбільш небезпечні механічні напруженості виникають на ділянках виходу обмотки з пазів статора. Оскільки механічне ушкодження ізоляції призводить до негайного або швидкого погіршення її діелектричних властивостей, до ізоляції обертових машин пред'являються жорсткі вимоги відносно її механічної міцності.

Улаштування ізоляції обертової машини високої напруги визначається конструкцією її статорної обмотки, яка залежить від потужності і номінальної напруги машини, від частоти обертання ротора і системи охолодження.

Кожна фаза обмотки статора складається з ряду послідовно сполучених витків, які можуть групуватися в котушки (котушкова обмотка) або укладатися нарізно (стрижнева обмотка, одновиткові котушки). Котушки розміщуються по пазах в один або два шари, тобто в кожному пазі може знаходитися по одній пазовій (активній) частині котушки або по дві від різних котушок однієї і тієї ж фази. У машинах високої напруги, як правило, використовуються двошарові обмотки. Для зменшення додаткових втрат в міді від вихрових струмів в машинах великої потужності витки на активних частинах котушок (стержнів) виконують з ізольованих один від одного елементарних провідників, що укладаються з транспозицією.

Ізоляція статорних обмоток електричних машин поділяється на головну (корпусну) і подовжню. Головною називається ізоляція між провідниками обмотки і корпусом. Вона має різну конструкцію на пазових і лобових частинах котушок, а також на виводах (лінійних і у нейтралі). До подовжньої відноситься ізоляція між витками однієї котушки, тобто міжвиткова (у стрижневих обмотках відсутня), а також ізоляція між укладеними в одному пази котушками.

Міжвитковою ізоляцією, а також ізоляцією між елементарними провідниками зазвичай служить власна ізоляція обмотувальних дротів. Залежно від типу обмотувального дроту вона являє собою три шари лавсанової плівки, покритих шаром бавовняної пряжі, або два шари склострічки, просочених нагрівостійким лаком, або дельта-асбестову ізоляцію.

Головна ізоляція статорів обмоток електричних машин високої напруги у зв'язку з дуже жорсткими вимогами до електричної і механічної міцності і

нагрівостійкості виконується тільки на основі слюдяних ізоляційних матеріалів. При цьому початкові матеріали і технологія виготовлення вибираються такими, щоб досягалися висока міцність і монолітність ізоляції в цілому. Пояснюється це тим, що, незважаючи на високу короностійкість самої слюди часткові розряди в газових включеннях, впливаючи на єднальні матеріали, все ж обмежують терміни служби ізоляції. Крім того, газові прошарки сильно знижують механічну міцність і теплопровідність ізоляції. Типовий випадок розташування обмотки в пазу ілюструє рис. 3.19.

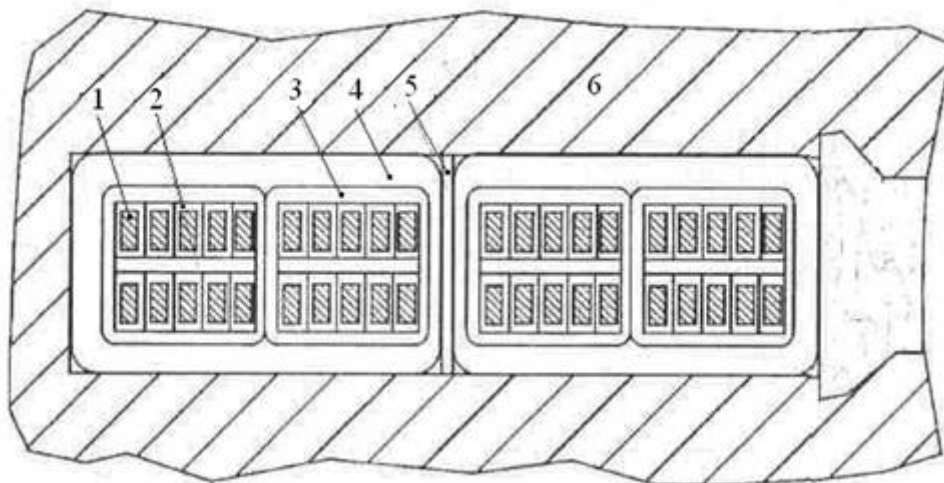


Рис. 3.19. Ізоляція обмотки статора: 1 – дріт мідний; 2 – ізоляція між елементарними провідниками; 3 – ізоляція між витками; 4 – корпусна ізоляція; 5 – ізоляція між шарами; 6 – сталь статора

Багато машин високої напруги виготовляються з безперервною ізоляцією, яку отримують шляхом просочення і опресування намотаних па стержень стрічок із слюдяних матеріалів. Така ізоляція має однакову структуру і міцність на усіх ділянках обмотки.

У сучасних великих генераторах, а також в більшості машин середньої потужності використовується термореактивна ізоляція. Така ізоляція не розм'якшується при нагріванні (загальна властивість термореактивних смол) і зберігає високу механічну і електричну міцність.

На пазових частинах обмотки використовуються покриття з питомим поверхневим опором 10^3 - 10^4 Ом, які щільно прилягають до поверхні ізоляції і в багатьох точках стикаються зі стінками паза. Завдяки цим покриттям електричне поле в повітряних щілинах відсутнє. Крім того, усуваються місцеві підвищення напруженості в області вентиляційних каналів в статорі.

3.3.5. Випробування ізоляції електричних машин

В процесі виготовлення ізоляції машини її електрична міцність багаторазово перевіряється підвищеною напругою промислової частоти протягом 1 хв.

Перше випробування ізоляції котушок або секцій статора і ротора здійснюється до укладання їх в паз. Значення випробувальної напруги залежить

від потужності і номінальної напруги машини. Котушки статорів або секції машин потужністю до 10 МВА випробовуються напругою $2,75U_{ном} + 4500$ В, ізоляція машин потужністю понад 10 МВА – напругою $2,75U_{ном} + 6500$ В, а після укладання обмотки в пази – відповідно напругою $2,5U_{ном} + 2500$ В і $2,5U_{ном} + 4500$ В.

Після паяння лобових з'єднань обмоток випробувальна напруга знижується до значень $2,25U_{ном} + 2000$ В і $2,25U_{ном} + 4000$ В, і, нарешті, при випуску машини встановлюються на рівні $2U_{ном} + 3000$ В.

В процесі експлуатації машин, наприклад турбогенераторів, окрім звичайного старіння ізоляції обмоток статорів, відмічені також інші ушкодження ізоляції. При незадовільному закріпленні стержнів обмоток в пазах спостерігається їх вібрація, при цьому ізоляція механічно стирається об стінки паза або розшаровується на виході з нього. При послабленні пресування активної сталі має місце вібрація, яка призводить до руйнування ізоляції і поломки пелюсток сталі в зубцевій зоні. Феромагнітні тіла (стружка, пелюстки сталі), що потрапили на поверхню ізоляції, в магнітному полі вібрують і ушкоджують ізоляцію.

У машинах з безпосереднім водяним охолодженням при порушенні щільності водяного тракту дистилат може зволожити ізоляцію, що знижує її електричну міцність. При експлуатації мали місце також випадки обвуглювання покривної кіперної стрічки в лобових частинах обмотки в результаті зволоження непросоченої стрічки і виникнення поверхневих розрядів.

Під час експлуатації ведеться систематичний нагляд за станом ізоляції електричних машин. Для своєчасного виявлення слабких місць ізоляція систематично піддається профілактичним випробуванням.

Контроль стану ізоляції статорів обмоток в основному здійснюється підвищеною напругою промислової частоти. Оптимальне значення випробувальної напруги і тривалість її прикладання встановлюються на підставі аналізу результатів експлуатації і з урахуванням технічній і економічній доцільності. Випробувальна напруга не повинна ушкоджувати ізоляцію, яка може надійно працювати, але повинна бути достатньою для того, щоб виявляти стержні з ізоляцією, що не забезпечує надійної роботи машини.

3.3.6. Питання для самоперевірки

1. Критично охарактеризувати ізоляцію силових кабелів різних типів.
2. Яким вимогам має задовольняти ізоляція силових кабелів?
3. Описати конструкцію ізоляції кабелю з в'язким просоченням, вказати переваги та недоліки такої ізоляції.
4. Розкрити область застосування та конструкцію оливонаповнених кабелів.
5. Які особливості конструкції оливонаповнених кабелів високого тиску в сталевих трубах Вам відомі?
6. Як сконструйовані газонаповнені кабелі? Яка їх область застосування?
7. Яким чином випробовується ізоляція силових кабелів?

8. Вкажіть основні вимоги до ізоляції електричних машин високої напруги.

9. Які матеріали використовуються при виготовленні ізоляції електричних машин високої напруги?

10. Розкрити порядок випробування ізоляції електричних машин.

3.4. Високовольтні випробувальні установки і методи проведення випробувань

Загальна характеристика випробувань. Випробувальні напруги промислової частоти. Випробувальні трансформатори і методи випробування ізоляції напругою промислової частоти. Випробувальні напруги комутаційних імпульсів.

3.4.1. Загальна характеристика випробувань

В процесі розроблення, виробництва і експлуатації ізоляція електроустаткування піддається типовим, періодичним, приймально-здавальним і профілактичним випробуванням.

Типові випробування проводяться на головних зразках або зразках з першої виробничої партії з метою оцінки відповідності характеристик нового типу виробу вимогам стандарту або технічних умов. Типові випробування також проводяться повністю або частково у разі зміни конструкції ізоляції або технологічного процесу виготовлення електроустаткування, а також заміни вживаних матеріалів, якщо вказані зміни можуть понизити електричну міцність ізоляції. Об'єм випробування встановлюється залежно від характеру змін.

Періодичні випробування проводяться на кожному типі електроустаткування, що випускається, після закінчення проміжку часу, вказаного у відповідному стандарті. Вони служать для перевірки якості і стабільності характеристик виробу і відповідності їх вимогам стандартів або технічних умов.

Кожен зразок електроустаткування при випуску з підприємства піддається приймально-здавальним випробуванням.

Випробування у споживача проводяться за програмою приймально-здавальних випробувань. При цьому випробувальні напруги повинні складати не більше 90% заводської випробувальної напруги, а для керамічних ізоляторів – 100%.

В процесі експлуатації електроустаткування проводяться профілактичні випробування, метою яких є своєчасне виявлення дефектів, що розвиваються, які можуть привести до виникнення аварії. Встановлення типових для цієї ізоляції дефектів, визначення зв'язку між електричними характеристиками ізоляції і виникаючими дефектами, розроблення і застосування різних способів визначення дефектів і методів відновлення дефектної ізоляції є заходами контролю і профілактики ізоляції.

3.4.2. Випробувальні напруги промислової частоти

Випробувальні короточасні напруги промислової частоти (50 Гц) встановлені з метою координації електричної міцності ізоляції електроустаткування зі значенням внутрішніх перенапруг, що впливають на неї.

При визначенні випробувальної напруги в цьому випадку за основу береться розрахункове значення внутрішніх перенапруг $U_{p.вн}$ в установках цього класу напруги:

$$U_{p.вн} = k_p \cdot U_{найб.р}, \quad (3.2)$$

де k_p – розрахункова кратність внутрішніх перенапруг; $U_{найб.р}$ – найбільша робоча напруга електроустаткування.

Розрахункові кратності внутрішніх перенапруг встановлені залежно від номінальної робочої напруги:

| | | | | | | | | |
|--------------------------|------|--------|-----|---------|-----|-----|-----|------|
| $U_{ном}, \text{кВ}....$ | 3-10 | 15, 20 | 35 | 110-220 | 330 | 500 | 750 | 1150 |
| k_p | 4,5 | 4,0 | 3,5 | 3,0 | 2,7 | 2,5 | 2,1 | 1,8 |

Випробування внутрішньої ізоляції електроустаткування здійснюється шляхом прикладення до неї випробувальної напруги протягом 1 хв, а в деяких випадках – протягом 5 хв.

При визначенні випробувальної напруги внутрішньої ізоляції $U_{випр}$ враховується коефіцієнт імпульсу $k_{имп}$ при дії внутрішніх перенапруг, тобто підвищення електричної міцності ізоляції при короточасних впливах, а також коефіцієнт $k_{кум}$, що враховує кумулятивний ефект і старіння ізоляції в процесі експлуатації:

$$U_{випр} = U_{розр.вн} \frac{k_{кум}}{k_{имп}}. \quad (3.3)$$

Коефіцієнт імпульсу $k_{имп}$ на підставі експериментальних даних приймається 1,3 для електроустаткування 3-35 кВ і 1,35 для електроустаткування інших класів напруги. Коефіцієнт кумулятивності $k_{кум}$ приймається 1,1-1,15.

Випробування зовнішньої ізоляції електроустаткування здійснюються як в сухому стані, так і під дощем стандартних параметрів. Випробувальна напруга для зовнішньої ізоляції під зливовим дощем визначається по формулі

$$U_{випр.д} = \frac{U_{розр.вн}}{k_{имп} k_m}, \quad (3.4)$$

де $k_{имп}$ – коефіцієнт імпульсу – приймається 1,1; k_m – коефіцієнт, що враховує можливі зміни атмосферного тиску, для висот до 1000 м він дорівнює 0,94.

При визначенні випробувальної напруги в сухих умовах враховується можливість зниження електричної міцності через зміни атмосферних умов і випробувальна напруга визначаються як

$$U_{випр.с} = U_{розр.вн}/0,84. \quad (3.5)$$

Випробувальна напруга зовнішньої ізоляції в сухому стані є основною характеристикою устаткування, призначеного для установки в закритих приміщеннях.

Слід зауважити, що не всі електроустановки пов'язані з повітряними мережами і піддаються дії грозових перенапруг. Деякі з них – зазвичай з номінальною напругою 3-15 кВ, наприклад підстанції, що працюють на кабельну мережу, – повністю захищені від дії грозових перенапруг. Вимоги до ізоляції електроустаткування таких установок визначаються цілком внутрішніми перенапругами. Електроустаткування в цих випадках може мати полегшену ізоляцію, і для нього нормується тільки випробувальна напруга промислової частоти.

Міжфазна ізоляція, як і ізоляція, відносно землі, підлягає в загальному випадку випробуванню. Імпульс грозової перенапруги, що набігає по одній фазі, наводить на двох інших фазах напругу того ж знаку, що зменшує різницю потенціалів між фазами. В той же час слід зважати на вплив робочої напруги, знак якої може бути протилежний до знаку наведеної імпульсної напруги. Досвід показує, що наведене імпульсне і робоча напруга значною мірою компенсуються, тому в якості розрахункової міжфазної грозової перенапруги приймається те ж значення, що і для ізоляції відносно землі.

Для міжфазної ізоляції електроустаткування 3-220 кВ визначальною є імпульсна випробувальна напруга, тому розрахункові внутрішні перенапруги для неї не були встановлені.

3.4.3. Випробувальні трансформатори і методи випробування ізоляції напругою промислової частоти

Особливістю випробувальних трансформаторів в порівнянні з силовими є мала потужність і обмежений час включення. Внаслідок цього вони в більшості випадків не мають конструктивних елементів, що служать для охолодження (ребер, труб для циркуляції оливи). Ізоляція випробувальних трансформаторів випробовується напругою (1,1-1,2) $U_{ном}$ і має порівняно малий запас електричної міцності.

Набули поширення випробувальні трансформатори трьох типів: в ізолюючому корпусі, в металевому корпусі з одним введенням і в металевому корпусі з двома введеннями.

Ізолюючий корпус випробувальних трансформаторів першого типу виготовляється з бакелізованого паперу, який забезпечений двома фланцями-електродами. Усередині корпусу розташовується магнітопровід з обмотками. Трансформатори такого типу призначені для установки в закритих приміщеннях.

Випробувальні трансформатори з металевим корпусом, забезпечені одним введенням з фарфоровою покришкою, можуть встановлюватися як в закритих приміщеннях, так і на відкритому повітрі. Прикладом можуть

служити трансформатори типу ИОМ-100 потужністю від 25 до 100 кВА (рис. 3.20) і типу ИОМ-500 потужністю 500 кВА (струм 1 А).

Проблема виведення напруги вдало вирішується в конструкціях трансформаторів з металевим баком і двома введеннями. У таких трансформаторів середня точка обмотки високої напруги електрично сполучена з баком, тому введення розраховуються на напругу $0,5U_{ном}$ і мають помірні розміри і масу. Самі трансформатори встановлюються на опорній ізоляційній конструкції, також розрахованій на напругу $0,5U_{ном}$. При звичайній схемі випробувань одне з введень заземлюється. Для отримання високої випробувальної напруги застосовується каскадне включення трансформаторів, при якому обмотки високої напруги трансформатора включаються послідовно, а живлення кожного наступного трансформатора здійснюється через попередній.



Рис. 3.20. Випробувальний трансформатор ИОМ-100/25

Номінальний струм більшості випробувальних трансформаторів складає 1 А. Проте при випробуваннях забруднених і зволжених ізоляторів передрозрядні струми досить великі і можуть викликати зниження напруги, що досягає 5-10 % $U_{ном}$, тому деякі випробувальні трансформатори мають номінальний струм до 3 А.

Сумарна діюча напруга вищих гармонік у випробувальній напрузі не повинна перевищувати 5 % основної гармоніки. Контроль форми напруги здійснюється за допомогою дільника напруги і осцилографа, які можуть використовуватися також для вимірювання напруги на об'єкті. Допускається відхилення частоти випробувальної напруги від номінальної 50 Гц не більше ніж на 10 %.

Під час випробування швидкість підйому напруги до 1/3 випробувальної може бути довільною, допускається навіть включення вказаної напруги

поштовхом. Потім напруга плавно і швидко зі швидкістю, що дозволяє виконувати вимірювання, доводиться до випробувальної. Після випробування напруга швидко знижується до $1/3$ випробувальної і відключається. При розрядах на об'єкті випробувальний трансформатор відключається захисним автоматичним вимикачем (рис. 3.21).



Рис. 3.21. Випробувальний трансформатор змінної напруги 300 кВ 250 кВА

При випробуваннях внутрішньої ізоляції випробувальна напруга на об'єкті витримується протягом 1 хв. Для класів ізоляції 220 кВ і нижче, якщо основна ізоляція складається з твердих органічних матеріалів (окрім паперово-оливної ізоляції) або кабельних мас, тривалість витримки випробувальної напруги повинна складати 5 хв. Ізоляція вважається такою, що витримала випробування, якщо під час його не спостерігалось повного розряду на об'єкті або неприпустимих ушкоджень. Наявність останніх встановлюється по комплексу непрямих ознак: потріскування усередині апарату, зміна показів приладів під час випробування, істотна зміна тангенсу кута діелектричних втрат після випробування тощо.

Випробування зовнішньої ізоляції в сухому стані і під дощем здійснюються методом триразового прикладання напруги при плавному підйомі. Відповідно до цього методу напруга на об'єкті підвищується до випробувального значення і відразу ж, без витримки, знижується.

Випробування повторюється 3 рази з інтервалами між прикладаннями напруги не менше 1 хв. Значення випробувальної напруги встановлюється з урахуванням атмосферних умов під час випробування.

Дощ повинен мати стандартні параметри: краплинну структуру, кут падіння 45° , силу 3 мм/мін ($\pm 10\%$), питомий опір води 100 Ом·м ($\pm 10\%$).

Об'єкт вважається таким, що витримав випробування, якщо не сталося жодного повного перекриття. У разі одного перекриття випробування повторюється, але при шести прикладаннях напруги. Якщо при повторному випробуванні не сталося жодного повного перекриття, то ізоляція вважається такою, що витримала випробування.

3.4.4. Випробувальні напруги комутаційних імпульсів

Випробувальна напруга комутаційних імпульсів встановлена для електроустаткування класів напруги 330 і 500 кВ. Випробування проводяться стандартними імпульсами. Ізоляція апаратів, ізоляторів і вимірювальних трансформаторів випробовується аперіодичними імпульсами 250/2500 мкс. Для випробування внутрішньої ізоляції силових трансформаторів застосовуються коливальні імпульси 100/1000 мкс.

Випробувальна напруга комутаційних імпульсів для ізоляції відносно землі встановлена на 15% вище за амплітудне значення верхньої межі пробивної напруги при промисловій частоті вентильних розрядників, що використовуються для обмеження внутрішніх перенапруг. Цей інтервал враховує можливість зменшення короткочасної міцності внутрішньої ізоляції в умовах експлуатації, відмінність форми випробувального імпульсу від можливих впливів під час експлуатації, зниження розрядної напруги зовнішньої ізоляції при роботі устаткування на висоті 1000 м і при температурі 35°C .

Випробувальні напруги комутаційних імпульсів для внутрішньої ізоляції між фазами силових трансформаторів прийнята в 1,5 рази вище, ніж відносно землі, а для зовнішньої міжфазної ізоляції – на 15% вище за розрахункову кратність внутрішніх перенапруг між фазами.

При визначенні випробувальної напруги для ізоляції між контактами вимикачів і роз'єднувачів врахована робоча напруга на іншому контакті з полярністю, що протилежна полярності імпульсу.

Для отримання аперіодичних комутаційних імпульсів з тривалістю фронту до 1000 мкс застосовуються генератори імпульсної напруги (ГІН). Збільшення тривалості фронту досягається включенням великого фронтового опору і додаткової ємності, паралельної об'єкту випробування. Слід мати на увазі що ГІН в режимі генерування комутаційних імпульсів має низький коефіцієнт використання.

В якості прикладу розглянемо систему випробування імпульсним струмом і імпульсною напругою (рис. 3.22), що призначена для створення напруги грозового і комутаційного імпульсу в діапазоні від 100 кВ до 12000 кВ і енергією імпульсу від 2,5 кДж до 1720 кДж, імпульсним струмом до 100кА. Базова випробувальна система може бути модифікована для проведення спеціальних випробувань струмообмежувальних реакторів, силових

трансформаторів, розподільних трансформаторів, вимірювальних трансформаторів напруги і струму, кабелів високої напруги, високовольтних введень і кабельних муфт, обмежувачів перенапруг (випробування імпульсним струмом), ізоляторів, елегазових розподільних пристроїв, гідрогенераторів, турбогенераторів.



Рис. 3.22. Система випробування імпульсним струмом та імпульсною напругою

3.4.5. Питання для самоперевірки

1. Які типи випробувань ізоляції застосовуються під час розроблення, виробництва і експлуатації електроустаткування?
2. З якою метою встановлені випробувальні короточасні напруги промислової частоти?
4. Як випробовується внутрішня ізоляція електроустаткування?
5. Який порядок випробування зовнішньої ізоляції електроустаткування?
6. Вказати особливості випробувальних трансформаторів в порівнянні з силовими.
7. Які типи випробувальні трансформатори Вам відомі?
8. Для якого електроустаткування встановлена випробувальна напруга комутаційних імпульсів?

РОЗДІЛ 4. ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ

Тематика лабораторних робіт тісно пов'язана з лекціями, тому під час підготовки до лабораторної роботи необхідно ґрунтовно вивчити відповідний теоретичний матеріал. Крім того, готуючись до лабораторної роботи, студент має ознайомитися з методичними вказівками, підготувати таблиці для реєстрації експериментальних даних. Лабораторні роботи виконуються з використанням віртуальних лабораторних стендів, зібраних з використанням програми MATLAB. Студенти отримують файли з моделями відповідних стендів для кожної лабораторної роботи. За результатами виконання кожної лабораторної роботи студент готує звіт згідно з вимогами, які наведені в кінці вказівок до кожної роботи. Студент має представити та захистити викладачеві звіт на наступному лабораторному занятті. Під час підготовки до захисту слід орієнтуватися на перелік контрольних запитань.

4.1. Лабораторна робота № 1. Дослідження електричної дуги при розмиканні контактів однієї фази силового вимикача

Мета: встановити залежність енергії, яка виділяється в електричній дузі при розмиканні контактів, від тривалості горіння дуги.

4.1.1. Опис віртуального лабораторного стенда

Лабораторна робота виконується із застосуванням віртуального стенда, виконаного за допомогою розширення Simulink пакета MATLAB (рис. 4.1). Ім'я файлу моделі – **LAB1_TVN.slx**.

Системні вимоги:

1. Операційна система – Windows10 (x64).
2. Mathworks Matlab 2016a (x64) або більш пізня версія.

Віртуальний стенд дозволяє досліджувати процес дугоутворення при розмиканні контактів полюсу високовольтного вимикача. Віртуальна лабораторна установка містить наступні елементи: джерело змінної напруги u_1 (10 кВ, 50 Гц); активний опір R_1 , що представляє активний опір елементів електромережі до місця встановлення вимикача; активний опір R_2 та ємність C_1 , які представляють активно-ємнісний опір ізоляції мережі від джерела живлення до вимикача відносно землі; полюс вакуумного вимикача, розрахованого на напругу 10 кВ; активний опір R_3 лінії від вимикача до навантаження; активний опір R_4 та ємність C_2 , які представляють активно-ємнісний опір ізоляції мережі від вимикача до навантаження відносно землі; активний опір R_5 та індуктивність L_1 навантаження.

Електрична дуга при розмиканні полюса вимикача описується моделлю Майра (Maуr), яка дозволяє визначити провідність дуги:

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln g}{dt} = \frac{k}{\tau} \left(\frac{qu^2}{P} - 1 \right), \quad (4.1)$$

де g – провідність електричної дуги; k – змінна, значення якої визначає стан контактів: $k=0$ – контакти замкнені, $k=1$ – контакти розімкнені; τ – стала часу дуги; u – напруга дуги; P – теплова потужність, що відводиться від місця дугоутворення.

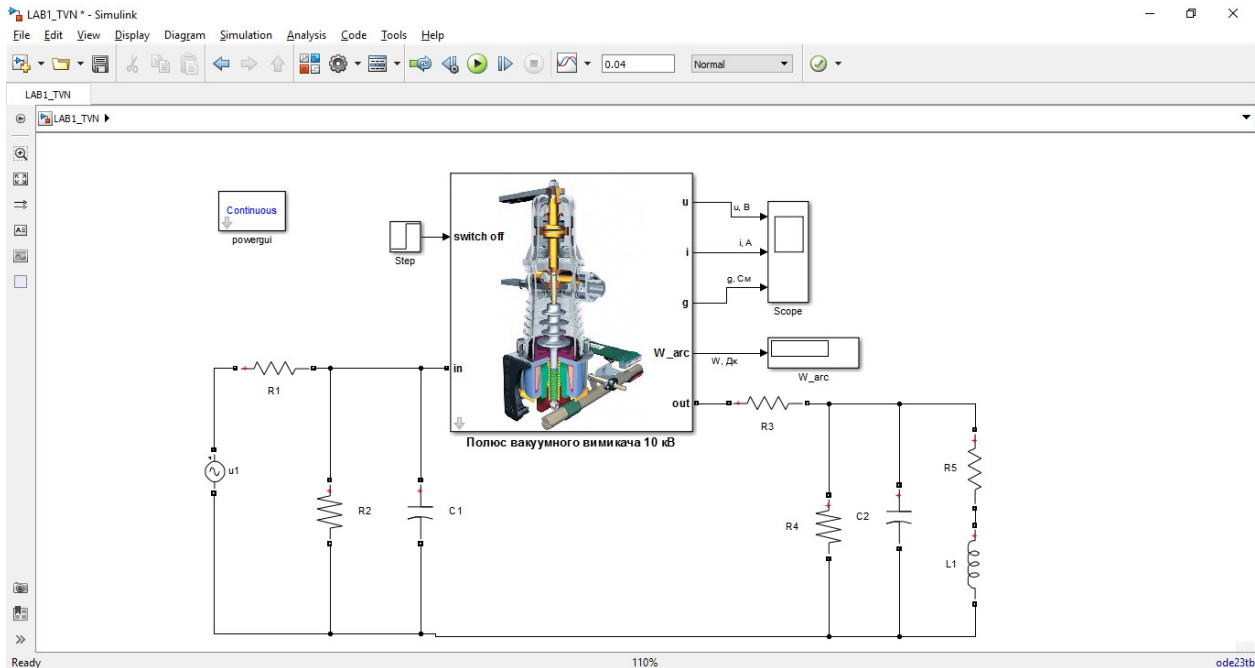


Рис. 4.1. Загальний вигляд віртуального лабораторного стенда у програмі Simulink (файл LAB1_TV.N.slx)

Модель полюса вакуумного вимикача дозволяє, за допомогою осцилографа Scope, отримувати графіки миттєвих значень напруги (u) між контактами, струму (i) через контакти та провідності (g) між контактами. Крім того, модель дозволяє визначати енергію (W_{arc}), що виділилася в електричній дузі за час її існування, при розмиканні контактів.

4.1.2. Порядок виконання роботи

1. Обрати вихідні дані з табл. 4.1 згідно з варіантом. Вихідними даними є значення активних опорів $R_1 - R_5$, ємностей C_1 , C_2 та індуктивності L_1 схеми заміщення мережі, в якій функціонує полюс вимикача. Також задається стала часу τ дуги та теплова потужність P , що відводиться від місця дугоутворення.

2. Запустити MATLAB, перейти в папку, яка містить файл LAB1_TV.N.slx, для чого скористатися адресним рядком головного вікна MATLAB.

3. Відкрити файл LAB1_TV.N.slx, рис. 4.2.

4. Задати параметри елементів моделі згідно з вихідними даними.

5. Задати в блоці Step час ступінчатого впливу (Step time) 0.011 секунд, рис. 4.3.

Таблиця 4.1

Вихідні дані

| вар. | R_1 | R_2 | R_3 | R_4 | R_5 | C_1 | C_2 | L_1 | τ | P |
|------|-------|-------------------|-------|------------------|-------|----------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-------|
| | Ом | Ом | Ом | Ом | Ом | Ф | Ф | Гн | с | Вт |
| 1 | 1 | $1 \cdot 10^6$ | 0,01 | $1 \cdot 10^6$ | 6 | $0,1 \cdot 10^{-6}$ | $0,2 \cdot 10^{-6}$ | $9 \cdot 10^{-4}$ | $0,3 \cdot 10^{-6}$ | 30900 |
| 2 | | $1,2 \cdot 10^6$ | | | 5,6 | $0,2 \cdot 10^{-6}$ | | | $0,2 \cdot 10^{-6}$ | |
| 3 | | | | | 5,4 | | | | | |
| 4 | 0,9 | $0,9 \cdot 10^6$ | 0,02 | $0,7 \cdot 10^6$ | 5 | $0,3 \cdot 10^{-6}$ | $0,15 \cdot 10^{-6}$ | $7 \cdot 10^{-4}$ | $0,25 \cdot 10^{-6}$ | 25000 |
| 5 | | | | | 6,7 | | | | | |
| 6 | | | | | 8 | | | | | |
| 7 | 0,8 | $0,85 \cdot 10^6$ | 0,04 | $0,8 \cdot 10^6$ | 6,9 | $0,25 \cdot 10^{-6}$ | $0,15 \cdot 10^{-6}$ | $6 \cdot 10^{-4}$ | $0,35 \cdot 10^{-6}$ | 32000 |
| 8 | | | | | 7 | | | | | |
| 9 | | | | | 6,3 | | | | | |
| 10 | 1,1 | $0,7 \cdot 10^6$ | 0,03 | $0,9 \cdot 10^6$ | 5 | $0,1 \cdot 10^{-6}$ | $0,3 \cdot 10^{-6}$ | $9 \cdot 10^{-4}$ | $0,32 \cdot 10^{-6}$ | 28900 |
| 11 | | | | | 7,8 | | | | | |
| 12 | | | | | 6,1 | | | | | |
| 13 | 1,2 | $1,1 \cdot 10^6$ | 0,009 | $1,1 \cdot 10^6$ | 5,9 | $0,15 \cdot 10^{-6}$ | $0,25 \cdot 10^{-6}$ | $5 \cdot 10^{-4}$ | $0,31 \cdot 10^{-6}$ | 31090 |
| 14 | | | | | 5,8 | | | | | |
| 15 | | | | | 6 | | | | | |
| | | | 0,01 | | | | $0,1 \cdot 10^{-6}$ | | | 30100 |

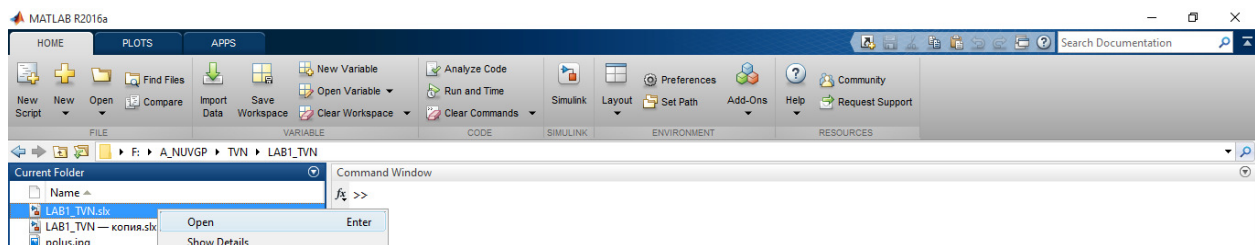


Рис. 4.2. Відкриття файлу моделі в MATLAB

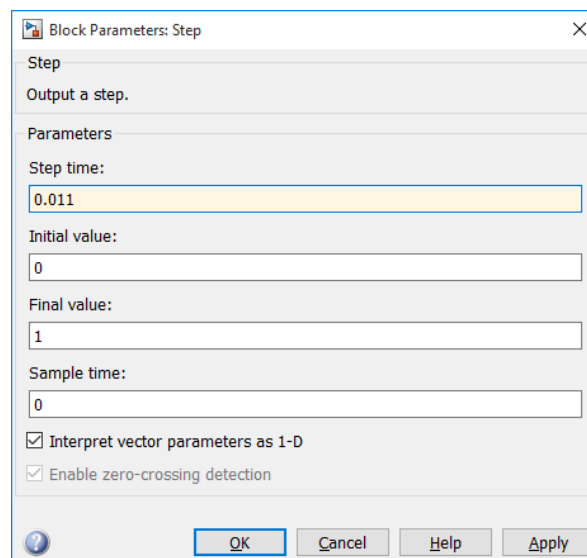
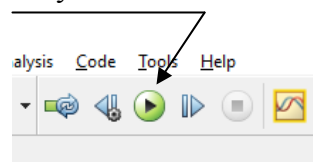


Рис. 4.3. Вікно параметрів блоку Step

6. Запустити модель:

Запуск моделі

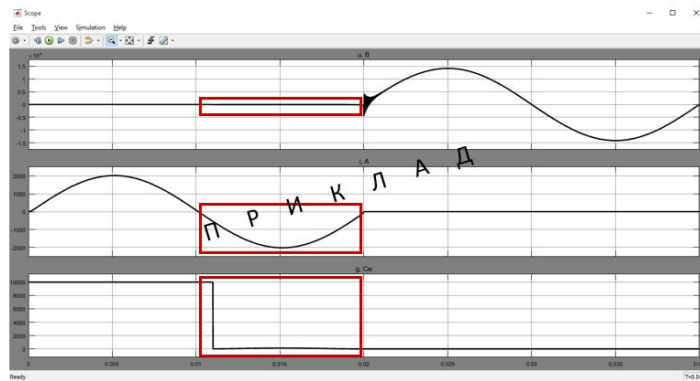


7. По закінченні моделювання занести до табл. 4.2 величину енергії, яка виділяється в електричній дузі (W_{arc}).

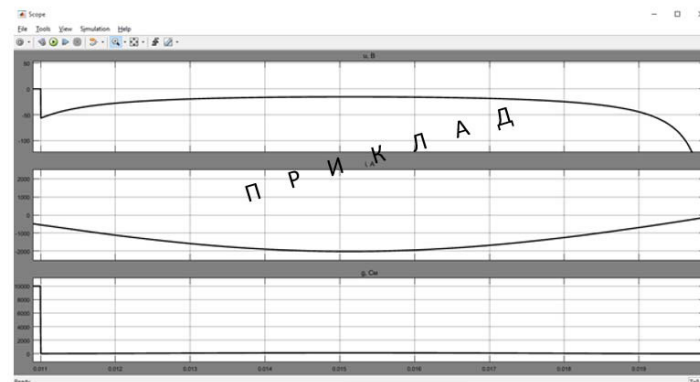
8. Повторити пп. 5-7 для визначених у табл. 4.2 моментів t_{off} відключення полюса вимикача. Для кожного моменту відключення фіксувати величину енергії, яка виділяється в електричній дузі

9. Зберегти графіки з осцилографу Scope при $t_{off}=0,011$ с та $t_{off}=0,019$ с.

При цьому для кожного моменту часу відключення необхідно зберегти загальний вигляд графіків (приклад наведено на рис. 4.4, а) і фрагменти графіків від моменту відключення вимикача до переходу струму через нуль (рис. 4.4, б).



а)



б)

Рис. 4.4. Приклади графіків:

а – загальний вигляд; б – під час горіння дуги

10. Побудувати, за даними табл. 4.2, залежність $W_{arc}(\Delta t_{arc})$ енергії, яка виділяється в електричній дузі при розмиканні контактів, від тривалості горіння дуги. Для цього можна скористатися командою plot системи MATLAB.

11. Проаналізувати отриману залежність та зробити висновки щодо характеру залежності енергії, яка виділяється в електричній дузі при розмиканні контактів, від тривалості горіння дуги.

Таблиця 4.2

Результати вимірювань

| Момент відключення полюса вимикача t_{off} , с (встановлювати у блоці Step, параметр Step time) | Тривалість існування дуги $\Delta t_{arc} = 0,02 - t_{off}$, с | Енергія в місці дугоутворення W_{arc} , Вт (записувати покази з індикатора W_arc) |
|--|---|---|
| 0,011 | 0,009 | |
| 0,012 | 0,008 | |
| 0,013 | 0,007 | |
| 0,014 | 0,006 | |
| 0,015 | 0,005 | |
| 0,016 | 0,004 | |
| 0,017 | 0,003 | |
| 0,018 | 0,002 | |
| 0,019 | 0,001 | |

4.1.3. Вміст звіту з лабораторної роботи

1. Тема, мета роботи.
2. Вихідні дані відповідно до варіанта.
3. Загальний вигляд віртуального лабораторного стенда.
4. Таблиця 4.2 з результатами вимірювань.
5. Графік залежності $W_{arc}(\Delta t_{arc})$.
6. Графіки з осцилографа Scope при $t_{off}=0,011$ с та $t_{off}=0,019$ (подібні до наведених на рис. 4.4).
7. Висновки щодо характеру залежності енергії, яка виділяється в електричній дузі при розмиканні контактів, від тривалості горіння дуги.

4.1.4. Питання для самоперевірки

1. Які причини виникнення електричної дуги при комутації? При відключенні яких кіл виникає електрична дуга?
2. Які Вам відомі засоби боротьби з дугою?
3. Які стадії розряду у вакуумі Вам відомі?
4. Яким чином поверхня електродів впливає на розвиток вакуумного пробою?
5. Що таке «автоелектронна емісія»?
6. Поясніть поняття «електричний вибух металу».

4.2. Лабораторна робота № 2. Дослідження вольт-амперної характеристики дуги полюса високовольтного вимикача

Мета: визначити динамічну вольт-амперну характеристику електричної дуги полюсів високовольтного вимикача

4.2.1. Опис віртуального лабораторного стенда

Лабораторна робота виконується з використанням віртуального лабораторного стенда (файл LAB2_TVN.slx), загальний вигляд якого наведено на рис. 4.5. Установка складається з трифазного симетричного джерела живлення u_A - u_C лінійною напругою 10 кВ, активно-індуктивних опорів фаз (RA1, LA1, RB1, LB1, RC1, LC1) та активно-ємнісних опорів ізоляції фаз (RizA1, CizA1, RizB1, CizB1, RizC1, CizC1) мережі від джерела живлення до вакуумного вимикача (Vacuum switch). активно-ємнісних опорів ізоляції фаз (RizA2, CizA2, RizB2, CizB2, RizC2, CizC2) мережі між вакуумним вимикачем та активно-індуктивним навантаженням (RA2, LA2, RB2, LB2, RC2, LC2). Сигнал на відключення вакуумного вимикача подається від блоку Step.

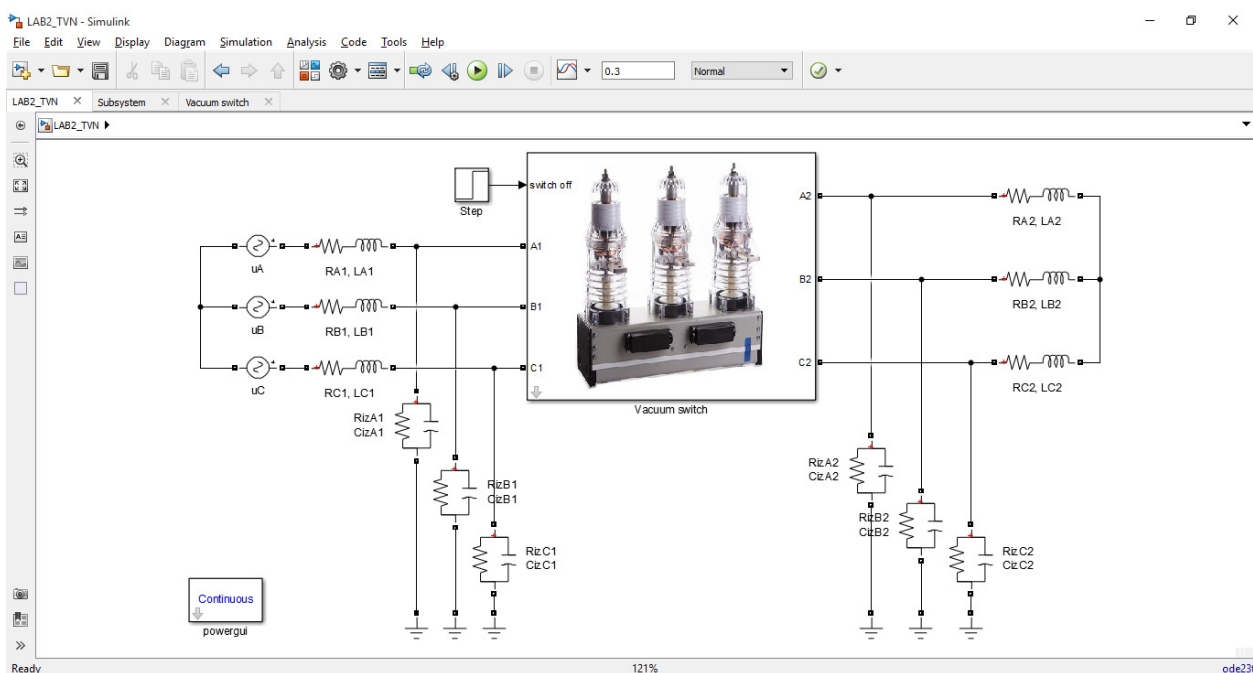
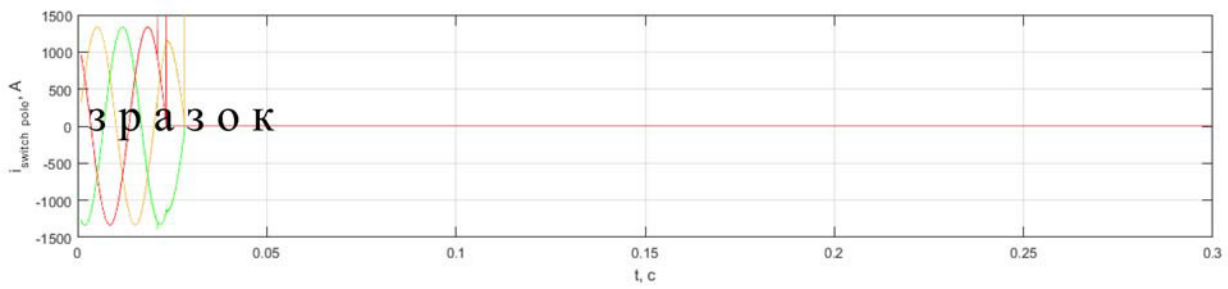


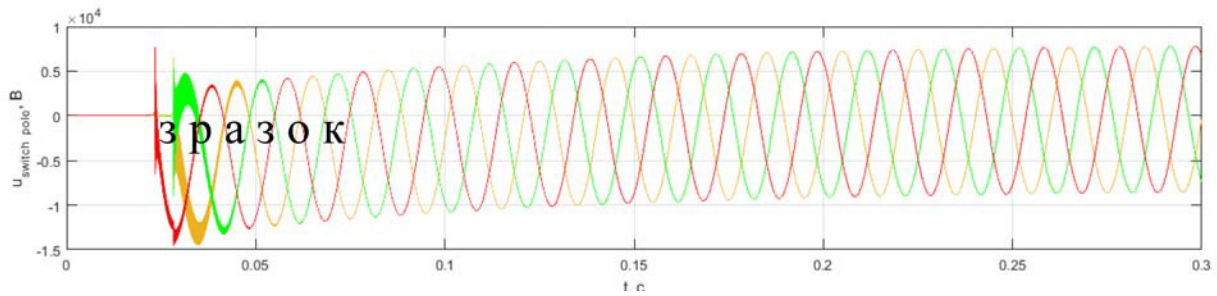
Рис. 4.5. Загальний вигляд віртуального лабораторного стенда у програмі Simulink (файл LAB2_TVN.slx)

Віртуальна лабораторна установка дозволяє отримувати осцилограми миттєвих значень струмів через полюси вимикача та напруги між контактами вимикача (рис. 4.6).

Також модель дозволяє будувати графіки миттєвих значень струмів, напруг дуги для трьох фаз та динамічні ВАХ дуги по кожній фазі (рис. 4.7).

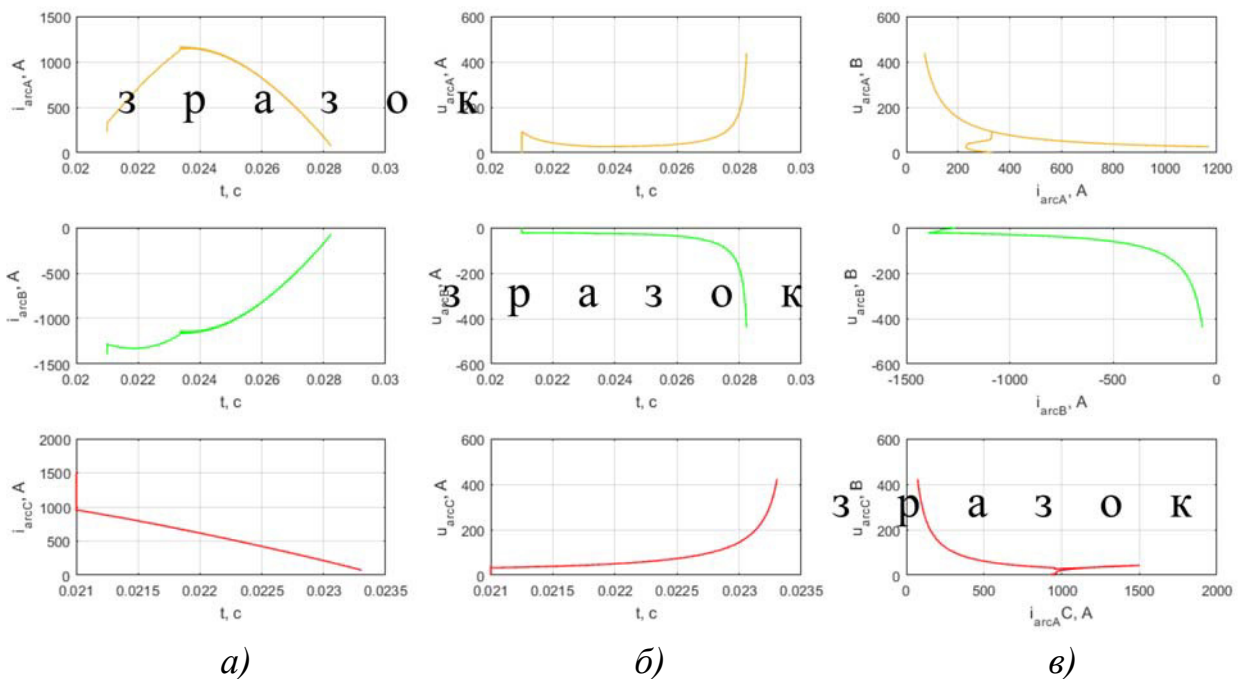


а)



б)

Рис. 4.6. Графіки миттєвих значень струмів (а) через полюси вакуумного вимикача та напруг (б) між контактами вимикача при відключенні



а)

б)

в)

Рис. 4.7. Графіки миттєвих значень струмів (а), напруг (б) дуги для трьох фаз та динамічні ВАХ дуги (в) по кожній фазі

4.2.2. Порядок виконання роботи

1. Обрати вихідні дані з табл. 4.3 згідно з варіантом. Вихідними даними є значення активних опорів R_{A2} , R_{B2} , R_{C2} та індуктивностей L_{A2} , L_{B2} , L_{C2} навантаження, стала часу τ дуги та теплова потужність P , що відводиться від місця дугоутворення.

Таблиця 4.3

| Вихідні дані | | | | |
|--------------|------------------------|------------------------|--------------------|--------------------|
| варіант | $R_{A2}=R_{B2}=R_{C2}$ | $L_{A2}=L_{B2}=L_{C2}$ | τ | P |
| | Ом | Гн | с | Вт |
| 1 | 7 | $9\cdot10^{-4}$ | $0,35\cdot10^{-6}$ | 31800 |
| 2 | | | $0,2\cdot10^{-6}$ | |
| 3 | 8 | $7\cdot10^{-4}$ | | $0,25\cdot10^{-6}$ |
| 4 | | | | |
| 5 | | | | |
| 6 | 10 | $6\cdot10^{-4}$ | $0,35\cdot10^{-6}$ | 32000 |
| 7 | | | | |
| 8 | | | | |
| 9 | 5 | $9\cdot10^{-4}$ | $0,32\cdot10^{-6}$ | 28900 |
| 10 | | | | |
| 11 | | | | |
| 12 | 6 | $5\cdot10^{-4}$ | $0,31\cdot10^{-6}$ | 31090 |
| 13 | | | | |
| 14 | | | | |
| 15 | 7 | | | 30100 |

2. Відкрити в MATLAB файл LAB2_TVN.slx.

3. Задати параметри елементів моделі згідно з вихідними даними.

4. Запустити модель, зберегти отримані графіки.

5. Користуючись отриманими графіками, провести аналіз перехідного процесу відключення вакуумного вимикача. При цьому необхідно пояснити причини та механізм запалення електричної дуги, характер зміни струмів та напруг дуги через полюси вимикача. Визначити моменти часу погасання дуги у кожному полюсі. Пояснити, чому дуга двох полюсів гасне одночасно. Проаналізувати динамічні ВАХ дуги полюсів.

При цьому слід пам'ятати, що дуга змінного струму, на відміну від дуги постійного струму, має змінні у часі струм та напругу. Електрична дуга змінного струму характеризується динамічною вольт-амперною характеристикою, яку зазвичай будують по осцилограмах напруги і струму (рис. 4.8). Динамічна ВАХ характеризує зміну напруги дуги у функції струму в діапазоні повного періоду.

Динамічна вольт-амперна характеристика дуги залежить від швидкості зміни струму і від його частоти. Гістерезисний характер ВАХ пояснюється тепловою інерційністю плазми дуги. Верхня вітка петлі властива початку напівперіоду, коли спостерігається зростання струму і розігрівання плазми, нижня – другій половині напівперіоду, коли струм, що знижується, проходить в плазмі, об'єм якої дорівнює максимальному струму, що протікав раніше.

6. Зробити висновки з результатами аналізу процесів при відключенні вакуумного вимикача.

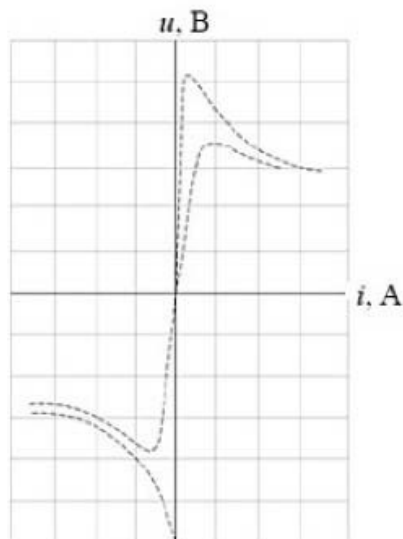


Рис. 4.8. Динамічна вольт-амперна характеристика дуги змінного струму

4.2.3. Вміст звіту з лабораторної роботи

1. Тема, мета роботи.
2. Вихідні дані відповідно до варіанта.
3. Загальний вигляд віртуального лабораторного стенда.
4. Графіки миттєвих значень струмів через полюси вакуумного вимикача та напруг між контактами вимикача при відключенні.
5. Графіки миттєвих значень струмів, напруг дуги для трьох фаз та динамічні ВАХ дуги по кожній фазі.
6. Письмовий аналіз перехідного процесу відключення вакуумного вимикача.
7. Висновки.

4.2.4. Питання для самоперевірки

1. Які причини виникнення дуги при відключенні вакуумного вимикача?
2. Як довго може існувати дуга між контактами вакуумного вимикача?
3. Що таке вольт-амперна характеристика?
4. Які відмінності між статичною та динамічною ВАХ?
5. Який вигляд має динамічна ВАХ електричної дуги між контактами силового комутаційного апарата при відключенні?

4.3. Лабораторна робота № 3. Дослідження механізму часткового розряду в твердих діелектриках

Мета: проаналізувати виникнення часткових розрядів в ізоляції високовольтних кабелів при прикладенні змінної напруги промислової частоти.

4.3.1 Опис віртуального лабораторного стенда

Лабораторна робота виконується з використанням віртуального лабораторного стенда (файл LAB3_TV.N.slx), загальний вигляд якого наведено

на рис. 4.9. Установка складається з джерела з випробувальної напруги з внутрішнім опором R , до якого підключається силовий кабель напругою 10 кВ, що випробовується. Проводяться випробовування на наявність часткових розрядів ізоляції між фазними провідниками та зовнішньою свинцевою оболонкою кабелю. Модель силового кабелю містить по одному включенню між кожною фазою та оболонкою. Параметри цих включень не є однаковими та мають стохастичний характер, що відповідає реальним умовам.

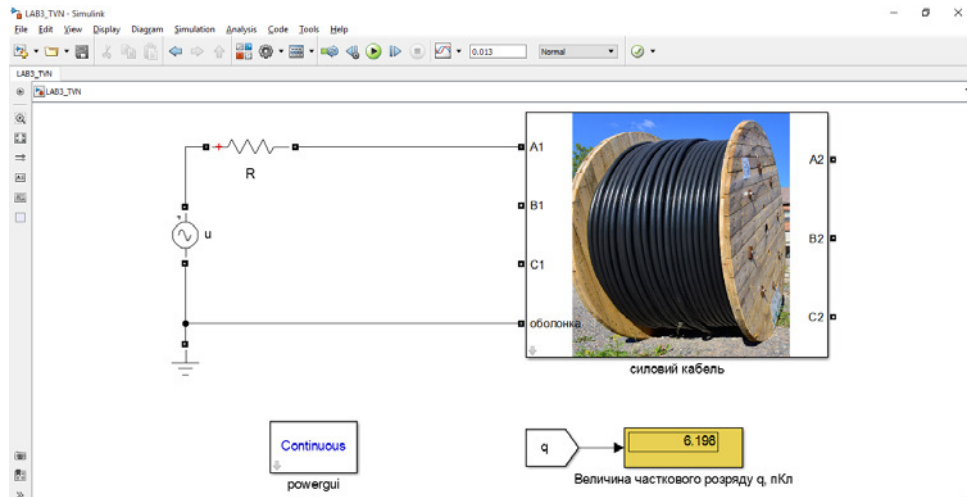
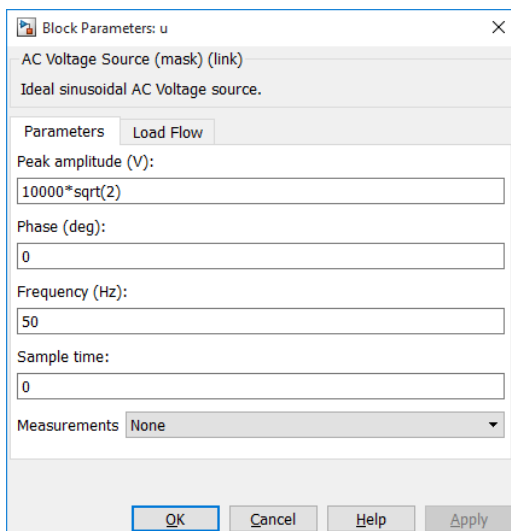
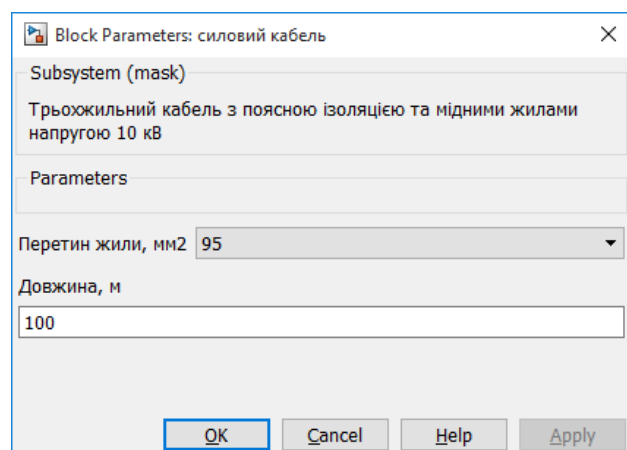


Рис. 4.9. Загальний вигляд віртуальної установки для дослідження часткових розрядів в ізоляції кабелю

Віртуальна лабораторна установка дозволяє задавати амплітуду випробувальної напруги, перетин жил та довжину кабелю, що випробовується (рис. 4.10). В результаті випробовувань оцінюється величина q (пКл) часткового заряду, що пройшов через включення, а також будують графіки напруги, що прикладається між фазним провідником кабелю та оболонкою, напруги на включенні та струму пробою включення (рис. 4.11).



а)



б)

Рис. 4.10. Вікна для задавання амплітуди випробувальної напруги (а) та параметрів кабелю (б)

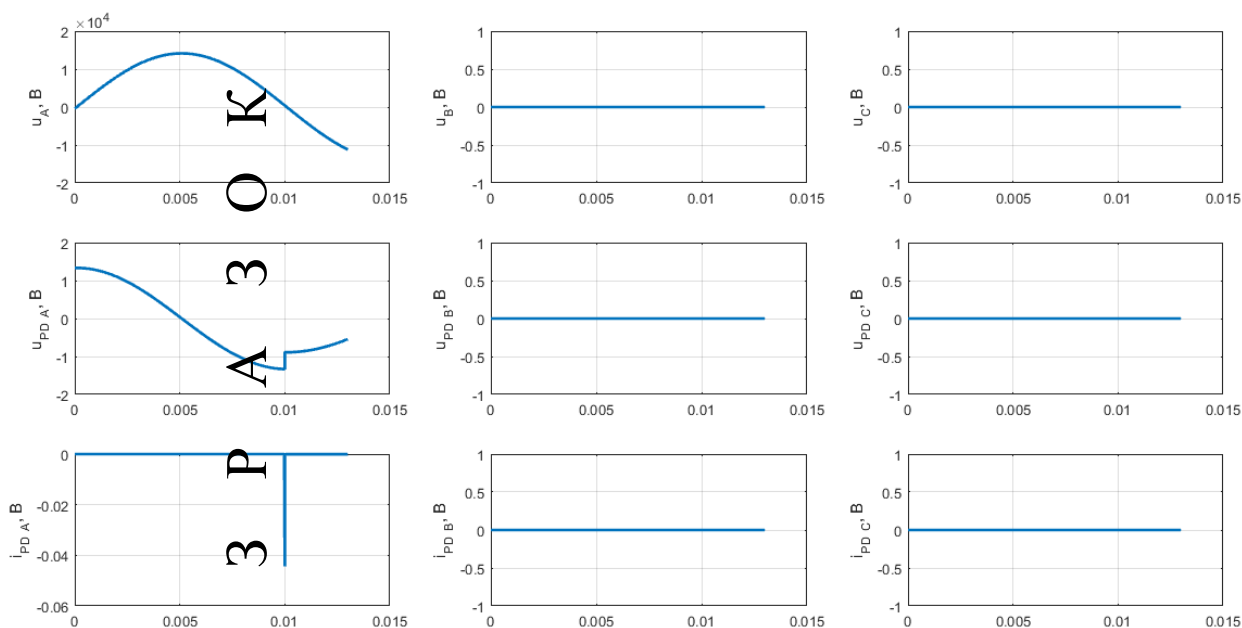


Рис. 4.11. Графіки, що характеризують процес виникнення часткового розряду в ізоляції кабелю між фазою А та свинцевою оболонкою:

u_A – випробувальна напруга; $u_{PD A}$ – напруга на включенні;

$i_{PD A}$ – струм пробою включення

4.3.2. Порядок виконання роботи

1. Обрати вихідні дані з табл. 4.4 згідно з варіантом. Вихідними даними є перетин жили s (мм²) та довжина L (м) кабелю.
2. Відкрити в MATLAB файл LAB3_TVN.slx.
3. Задати параметри елементів моделі згідно з вихідними даними.

Таблиця 4.4

Вихідні дані

| № варіанта | s , мм ² | L , м | № варіанта | s , мм ² | L , м |
|------------|-----------------------|---------|------------|-----------------------|---------|
| 1 | 25 | 100 | 11 | 25 | 350 |
| 2 | 35 | 200 | 12 | 35 | 450 |
| 3 | 50 | 300 | 13 | 120 | 200 |
| 4 | 70 | 400 | 14 | 95 | 500 |
| 5 | 95 | 500 | 15 | 70 | 140 |
| 6 | 120 | 600 | 16 | 50 | 260 |
| 7 | 35 | 400 | 17 | 35 | 180 |
| 8 | 25 | 500 | 18 | 70 | 450 |
| 9 | 120 | 150 | 19 | 95 | 300 |
| 10 | 95 | 250 | 20 | 35 | 350 |

4. Підключити джерело випробувальної напруги до фази А кабелю. Встановити випробувальну напругу 10 кВ (рис. 4.10, а), тобто встановити значення параметра Peak amplitude = $10000 \cdot \sqrt{2}$ джерела u.

5. Запускаючи модель, отримувати величини часткового заряду q (пКл), які заносити до табл. 4.5. Дослід повторювати 3 рази.

6. Повторити досліди за пп. 4, 5 для випробувальних напруг 15 кВ та 20 кВ та для всіх фазних провідників кабелю. Дані слід заносити до табл. 4.5.

7. Обчислити середню величину розряду \bar{q} для кожного рівня випробувальної напруги для кожного фазного провідника, дані занести до табл. 4.5.

8. Для довільно обраних умов (фазний провідник, рівень випробувальної напруги) зберегти та проаналізувати графіки, що характеризують процес виникнення часткового розряду в ізоляції кабелю.

9. Користуючись отриманими в табл. 4.5 даними, зробити висновок щодо придатності кабелю до експлуатації. При цьому слід мати на увазі, що величина q для всіх рівнів випробувальної напруги не має перевищувати 10 пКл.

10. Зробити висновки з результатами аналізу придатності кабелю до експлуатації.

Таблиця 4.5

Результати вимірювань

| Величина часткового розряду, пКл | | Випробувальна напруга | | |
|----------------------------------|-------------|-----------------------|-------|-------|
| | | 10 кВ | 15 кВ | 20 кВ |
| фаза А | q_{A1} | | | |
| | q_{A2} | | | |
| | q_{A3} | | | |
| | \bar{q}_A | | | |
| фаза В | q_{B1} | | | |
| | q_{B2} | | | |
| | q_{B3} | | | |
| | \bar{q}_B | | | |
| фаза С | q_{C1} | | | |
| | q_{C2} | | | |
| | q_{C3} | | | |
| | \bar{q}_C | | | |

4.3.3. Вміст звіту з лабораторної роботи

1. Тема, мета роботи.
2. Вихідні дані відповідно до варіанта.
3. Загальний вигляд віртуального лабораторного стенда.

4. Графіки, що характеризують процес виникнення часткового розряду в ізоляції кабелю, та їх аналіз.
5. Табл. 4.5 з результатами вимірювань та розрахунків.
6. Висновки з результатами аналізу придатності кабелю до експлуатації.

4.3.4. Питання для самоперевірки

1. Пояснити термін «частковий розряд».
2. Які причини спричиняють виникнення часткових розрядів?
3. До яких наслідків призводять часткові розряди?
4. Чому важливо випробовувати високовольтне обладнання на часткові розряди?

4.4. Лабораторна робота № 4. Дослідження перехідних процесів в елементах електрообладнання при ударі блискавки

Мета: дослідити перенапруги, що виникають у мережі 10 кВ при ударі блискавки в лінійний провід

4.4.1. Опис віртуального лабораторного стенда

Лабораторна робота виконується з використанням віртуального лабораторного стенду (файл LAB4_TVN.slx), загальний вигляд якого наведено на рис. 4.12. Установка складається з джерела трифазної симетричної напруги 10 кВ (u_A , u_B , u_C), лінії електропередавання W та активно-індуктивного навантаження RL1. Лінія W розділена на 2 частини: W1 та W2, між якими в лінійний провід фази A виникає удар блискавки. Також схема містить три розрядники FV1, FV2, FV3 (типу РВО-11), які можуть бути підключені до мережі, або відключені.

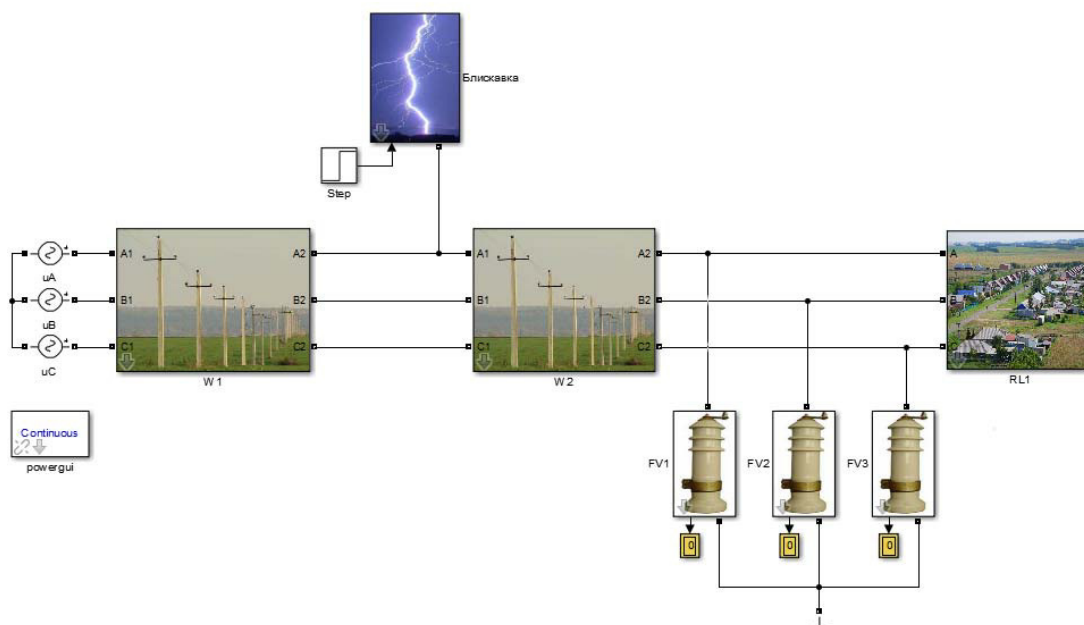


Рис. 4.12. Схема віртуальної лабораторної установки

4.4.2. Порядок виконання роботи

1. Відкрити в MATLAB файл LAB4_TVN.slx.

2. Обрати вихідні дані. Вихідними даними для виконання роботи є активна потужність (P , кВт) навантаження RL1, величина якої обраховується згідно з номером N варіанта:

$$P=200 \cdot N.$$

Отримане значення необхідно занести до вікна параметрів навантаження RL1 (рис. 4.13).

3. Дослідити вплив удару блискавки на функціонування навантаження при відсутності розрядників.

3.1 Відключити розрядники FV1, FV2, FV3 від електромережі.

3.2 Задавати струм блискавки $I_{\text{ол}}=5, 6, \dots, 30$ кА у вікні параметрів блискавки (рис. 4.14).

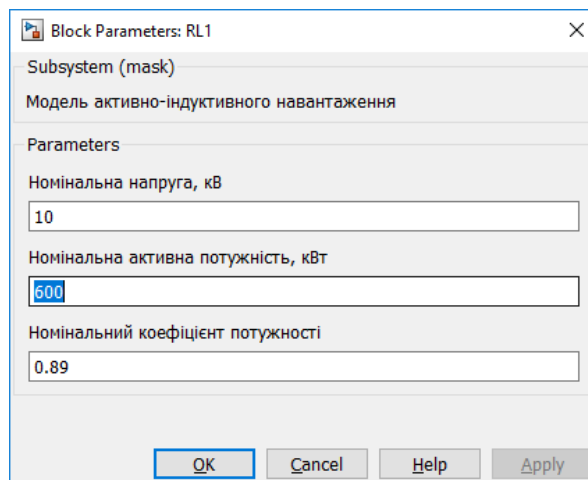


Рис. 4.13. Вікно параметрів навантаження

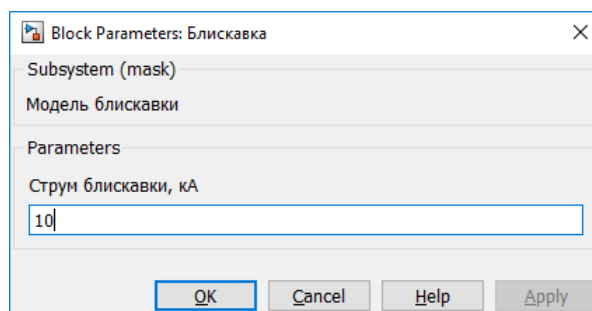


Рис. 4.14. Вікно параметрів блискавки

3.3 Для кожного значення струму блискавки здійснювати моделювання і за отриманими графіками визначати відносне значення імпульсу струму навантаження, в.о.:

$$I_{\text{max RL1}}^* = \frac{I_{\text{max RL1}}}{I_{\text{ном}}},$$

де $I_{\max RL1}$ – максимальне значення імпульсу струму навантаження для трьох фаз через удар блискавки, А; $I_{\text{ном}}$ – амплітудне значення струму навантаження в нормальному режимі, А.

Результати заносити до табл. 4.6.

Таблиця 4.6

Результати дослідження впливу струму блискавки на імпульс струму через навантаження

| | | | | | | | |
|-------------------------|---|---|--|-----|--|--|----|
| $I_{\text{бл}}$, кА | 5 | 6 | | ... | | | 30 |
| $I_{\max RL1}$, А | | | | | | | |
| $I_{\max RL1}^*$, В.О. | | | | | | | |

3.4 Побудувати графік залежності $I_{\max RL1}^* = f(I_{\text{бл}})$.

4. Дослідити вплив удару блискавки на струм через розрядники.

4.1 Підключити розрядники FV1, FV2, FV3 до електромережі.

4.2 Задавати струм блискавки $I_{\text{бл}}=5, 6, \dots, 30$ кА у вікні параметрів блискавки (рис. 4.14).

4.3 Для кожного значення струму блискавки здійснювати моделювання і за отриманими графіками визначати максимальне значення імпульсу струму через розрядники фаз. Результати заносити до табл. 4.7.

Таблиця 4.7

Результати дослідження впливу струму блискавки на імпульс струму через розрядники

| | | | | | | |
|--------------------------------|---|---|--|-----|--|----|
| $I_{\text{бл}}$, кА | 5 | 6 | | ... | | 30 |
| I_{FV1} , кА (синя лінія) | | | | | | |
| I_{FV2} , кА (червона лінія) | | | | | | |
| I_{FV3} , кА (жовта лінія) | | | | | | |

4.4 Побудувати залежності $I_{FV} = f(I_{\text{бл}})$ для кожного розрядника.

5. Зробити висновки, де проаналізувати:

- вплив струму блискавки на імпульс струму через навантаження при відсутності та за наявності розрядників;
- вплив струму блискавки на імпульс струму через розрядники.

4.4.3. Вміст звіту з лабораторної роботи

1. Тема, мета роботи.
2. Вихідні дані відповідно до варіанта.
3. Загальний вигляд віртуального лабораторного стенда.
4. Графіки, що характеризують перехідні процеси в мережі за наявності та відсутності розрядників (для одного значення струму блискавки).
5. Табл. 4.6 та 4.7 з результатами вимірювань.

6. Графік залежності $I_{\max RL1}^* = f(I_{\text{бл}})$.
7. Графіки залежності $I_{FV} = f(I_{\text{бл}})$ для кожного розрядника.
8. Висновки.

4.4.4. Питання для самоперевірки

1. Описати механізм виникнення грозової перенапруги.
2. Які засоби захисту від грозових перенапруг Вам відомі?
3. Що розуміють під вольт-секундною характеристикою проміжку?
4. Назвіть переваги та недоліки розрядників типу РВО.

4.5. Лабораторна робота № 5. Дослідження комутаційних перенапруг при автоматичному повторному ввімкненні лінії

Мета: дослідити перенапруги при АПВ лінії 110 кВ з двостороннім живленням.

4.5.1. Опис віртуального лабораторного стенда

Лабораторна робота виконується з використанням віртуального лабораторного стенду (файл LAB5_TV.N.slx), загальний вигляд якого наведено на рис. 4.15. Установка дозволяє дослідити перенапруги, які виникають в мережі напругою 110 кВ при автоматичному повторному ввімкненні (АПВ). Установка складається з двох джерел (ua1-uc1 та ua2-uc2) напруги 110 кВ із глухозаземленими нейтралями, внутрішній опір яких представлений активно-індуктивними опорами RL1 та RL2 відповідно. За допомогою високовольтичних вимикачів Q1 та Q2 джерела з'єднані лінією електропересилання довжиною 250 км, в якій виникає замикання на землю (біля вимикача Q2). При цьому спрацьовує релейний захист та схема АПВ.

Використання АВП засновано на тому, що більшість замикань носить дуговий характер. Тому при відключенні лінії з КЗ з обох боків дуга може погаснути і лінія може бути знову ввімкнена через проміжок часу $t_{АПВ}$. Цикл АПВ можна розділити на наступні етапи:

- 1) відключення лінії вимикачем Q2, найближчим до місця замикання, що переводить лінію в режим одностороннього живлення (сигнал на відключення Q2 подає блок Step1);
- 2) відключення лінії вимикачем Q1 (реалізується блоком Step2), що обриває струм замикання при переході через нуль;
- 3) повторне ввімкнення лінії вимикачем Q1 (реалізується блоком Step3);
- 4) замикання вимикача Q2 та відновлення нормального режиму електропостачання (реалізується блоком Step4).

Після відключення лінії вимикачем Q1 заряд на пошкодженій фазі стікає в землю через дугу, а на непошкоджених фазах відбувається процес вирівнювання напруги. Максимальні перенапруги виникають при повторному ввімкненні розімкненої лінії вимикачем Q1.

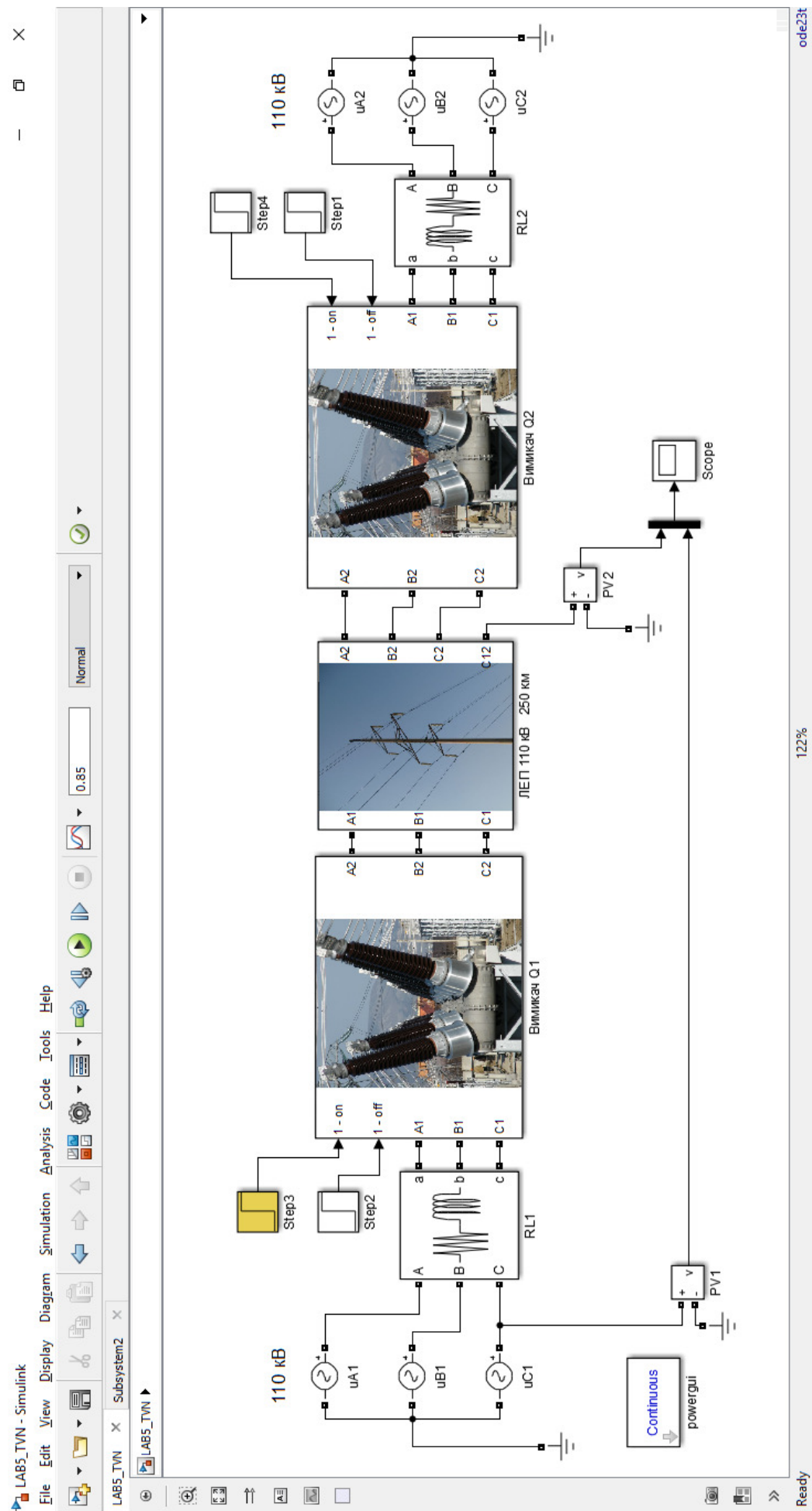


Рис. 4.15. Схема віртуальної лабораторної установки (файл LAB5_TVN.slx)

З точки зору експлуатації найбільше значення має *ударний коефіцієнт*, що характеризує перенапругу. Для його обрахунку використовується залежність:

$$k_{y\partial} = \frac{U_{max}}{A_{yct}}, \quad (4.2)$$

де A_{yct} – амплітуда найбільшої робочої напруги, В; U_{max} – максимальне значення перенапруги, В.

Значення U_{max} , а, відповідно, і ударного коефіцієнта, суттєво залежать від кута ввімкнення (φ) вимикача Q1. В інтервалі кутів φ від 0° до 180° знаки напруги на лінії (U_0) та ЕРС джерела (E) протилежні, що визначає суттєво більші значення ударного коефіцієнта порівняно, ніж в інтервалі кутів φ від 180° до 360° , коли знаки U_0 та E співпадають. Характерний вид залежності $k_{y\partial} = f(\varphi)$ наведено на рис. 4.16. Для порівняння пунктиром наведена крива $k_{y\partial} = f(\varphi)$ при підключенні незарядженої лінії. З порівняння кривих видно, що максимальний ударний коефіцієнт при АПВ суттєво зростає за рахунок напруги залишкового заряду.

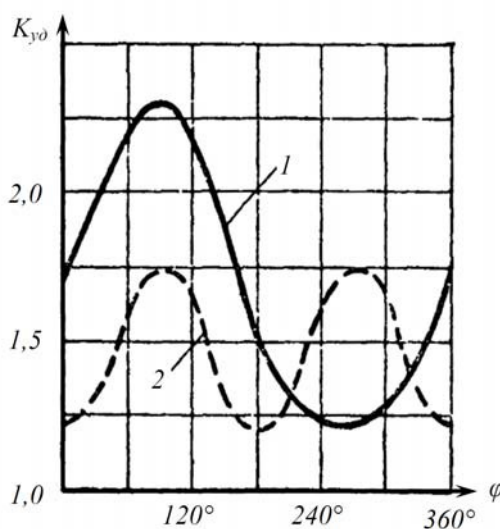


Рис. 4.16. Залежність $k_{y\partial} = f(\varphi)$ при ввімкненні розімкненої лінії в циклі АПВ:

1 – підключення зарядженої лінії; 2 – підключення незарядженої лінії

4.5.2. Порядок виконання роботи

1. Відкрити в MATLAB файл LAB5_TV.N.slx.
2. Задати у блоці Step3 параметр Step time = 0,6908 с, що відповідає куту ввімкнення $\varphi = 0^\circ$ (табл. 4.8).
3. Здійснити моделювання.
4. Відкрити вікно осцилографа Scope. Орієнтовний вид графіків зображено на рис. 4.17. Записати значення A_{yct} – амплітуда найбільшої робочої напруги (це значення лишається незмінним для всіх дослідів). Записати у табл. 4.8 модуль максимального значення перенапруги $|U_{max}|$.

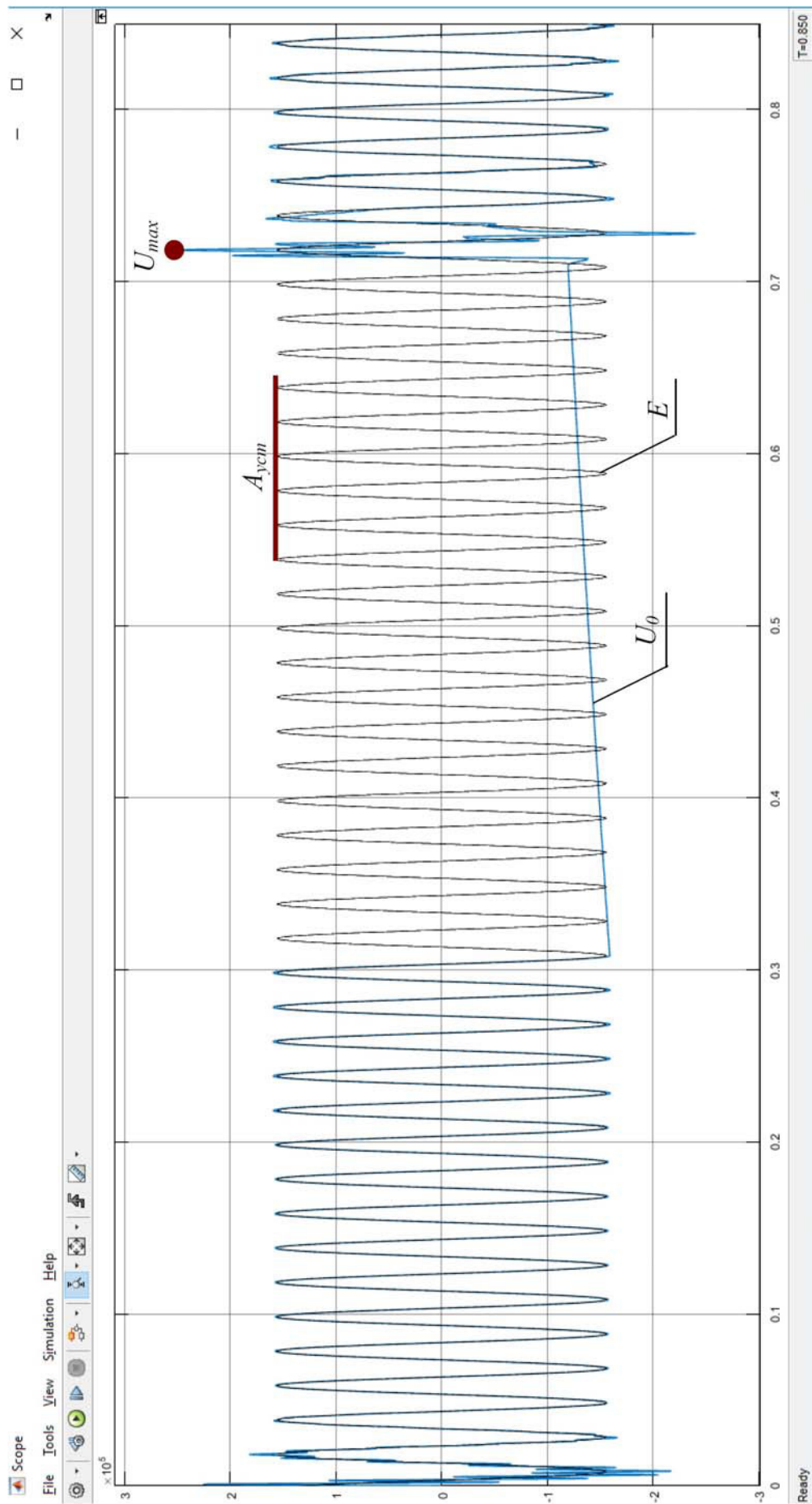


Рис. 4.17. Графіки миттєвих значень ЕРС джерела (E) та напруги на лінії (U_0)

5. Повторити пп. 2-4 для всіх моментів ввімкнення вимикача з табл. 4.8.
6. Обчислити в табл. 4.8 значення ударних коефіцієнтів для всіх кутів ввімкнення згідно з (4.2).
7. Побудувати графік залежності $k_{y\partial} = f(\varphi)$ на основі експериментальних даних з табл. 4.8.
8. Зробити висновки.

Таблиця 4.8

Результати вимірювань

| Кут ввімкнення φ , град. | Момент ввімкнення вимикача Q1, с (задається у блоці Step3) | Модуль максимального значення перенапруги $ U_{max} $, В | Ударний коефіцієнт $k_{y\partial}$ |
|-------------------------------------|--|---|---------------------------------------|
| 0° | 0,6908 | | |
| 45° | 0,6933 | | |
| 90° | 0,6958 | | |
| 135° | 0,6983 | | |
| 180° | 0,7008 | | |
| 225° | 0,7033 | | |
| 270° | 0,7058 | | |
| 315° | 0,7083 | | |
| 360° | 0,7108 | | |

4.5.3. Вміст звіту з лабораторної роботи

1. Тема, мета роботи.
2. Загальний вигляд віртуального лабораторного стенда.
3. Графіки миттєвих значень ЕРС джерела (E) та напруги на лінії (U_0) для довільного значення кута ввімкнення.
4. Табл. 4.8 з експериментальними даними.
5. Графіки залежності $k_{y\partial} = f(\varphi)$.
6. Висновки.

4.5.4. Питання для самоперевірки

1. Вкажіть причини виникнення та наслідки комутаційних перенапруг.
2. Описати механізм виникнення комутаційних перенапруг при АПВ лінії.
3. Що позначає термін «кут ввімкнення вимикача»?
4. Яким чином визначається ударний коефіцієнт?
5. Чи залежить величина перенапруги від величини напруги залишкового заряду на лінії?

4.6. Лабораторна робота № 6. Дослідження підвищення напруги в кінці розімкненої лінії

Мета: дослідити залежність коефіцієнта передачі від довжини розімкненої ЛЕП.

4.6.1. Короткі теоретичні відомості

В режимі синхронізації або раптового скидання навантаження до джерела синусоїдної ЕРС виявляється підключена розімкнена лінія (рис. 4.18).

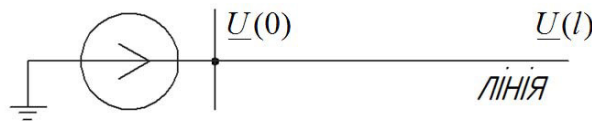


Рис. 4.18. Підключення розімкненої лінії до джерела синусоїдної ЕРС

Комплекс напруги $\underline{U}(0)$ на початку зв'язаний з комплексом напруги $\underline{U}(l)$ в кінці розімкненої лінії довжиною l наступним співвідношенням:

$$\underline{U}(0) = \underline{U}(l) \cdot \text{ch}(l \cdot \underline{\gamma}), \quad (4.3)$$

де ch – гіперболічний косинус; $\underline{\gamma}$ – стала розповсюдження (комплексна величина).

При нехтуванні коронуванням проводів стала розповсюдження дорівнює:

$$\underline{\gamma} = \sqrt{(r_0 + jx_0) \cdot jb_0}, \quad (4.4)$$

де r_0 , x_0 , b_0 – питомі значення активного опору, індуктивного опору та ємнісної провідності (зарядної потужності) лінії.

Відношення напруги в кінці лінії до напруги на початку лінії називається коефіцієнтом передачі і визначається згідно з виразом (4.3):

$$\underline{K} = \frac{\underline{U}(l)}{\underline{U}(0)} = \frac{1}{\text{ch}(l \cdot \underline{\gamma})} = \frac{1}{\text{ch}(l \cdot \sqrt{(r_0 + jx_0) \cdot jb_0})}. \quad (4.5)$$

Відношення діючих значень напруги визначається як модуль $|\underline{K}(l)|$ коефіцієнта передачі згідно з виразом (4.5). Залежність $|\underline{K}(l)|$ носить явно виражений резонансний характер.

4.6.2. Опис віртуального лабораторного стенда

Лабораторна робота виконується з використанням віртуального лабораторного стенда (файл LAB6_TV.N.slx), загальний вигляд якого наведено на рис. 4.19. Установка дозволяє дослідити перенапруги, які виникають в кінці розімкненої ЛЕП.

Схема лабораторної установки включає трифазне симетричне джерело синусоїдної ЕРС u_A-u_C із глухозаземленою нейтраллю, до якого підключено розімкнену лінію ЛЕР. Фазна напруга на початку лінії вимірюється за допомогою вимірювального трансформатора напруги TV1 (наприклад, типу НКФ), виміряне значення відображається на дисплеї U_1 (кВ). Фазна напруга в кінці лінії вимірюється трансформатором TV2, виміряне значення знімається з дисплея U_2 (кВ).

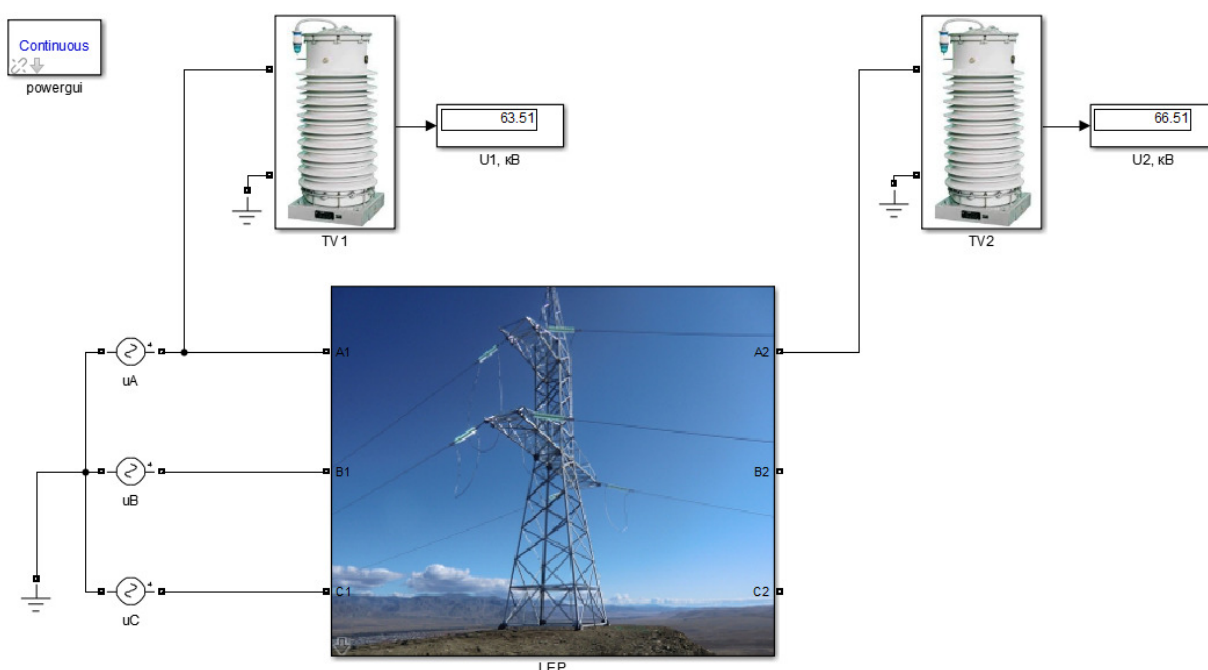


Рис. 4.19. Схема віртуальної лабораторної установки

4.6.3. Порядок виконання роботи

1. Обрати вихідні дані з табл. 4.9 згідно з номером варіанта.
2. Виписати з табл. 3.8 на стор. 87 довідника [12], питомі значення параметрів лінії: активного опору r_0 (Ом/км), індуктивного опору x_0 (Ом/км) та зарядної потужності b_0 (См/км). Значення параметрів занести до табл. 19.2.
3. Відкрити в MATLAB файл LAB6_TVN.slx.
4. Задати номінальну напругу мережі згідно з табл. 4.10. Для цього необхідно у вікнах параметрів джерел uA-uC в полі Peak amplitude внести амплітудне значення фазної напруги мережі (рис. 4.20, а). Наприклад, для мережі 110 кВ треба внести $110000 \cdot \sqrt{2/3}$.

5. Задати параметри лінії електропередачі, користуючись вікном параметрів блоку ЛЕР (рис. 4.20, б). Значення питомих параметрів лінії r_0 , x_0 , b_0 вносяться згідно з табл. 4.10. Довжину лінії задати 100 км.

Таблиця 4.9

Вихідні дані

| Варіант № | Номінальна напруга мережі, кВ | Марка проводу АС- | Варіант № | Номінальна напруга мережі, кВ | Марка проводу АС- |
|-----------|-------------------------------|-------------------|-----------|-------------------------------|-------------------|
| 1 | 110 | 70/40 | 11 | 110 | 150/24 |
| 2 | 150 | 120/19 | 12 | 110 | 185/29 |
| 3 | 110 | 95/16 | 13 | 150 | 150/29 |
| 4 | 150 | 150/24 | 14 | 110 | 240/32 |
| 5 | 150 | 185/29 | 15 | 110 | 70/11 |
| 6 | 110 | 120/19 | 16 | 150 | 185/29 |
| 7 | 110 | 150/24 | 17 | 150 | 240/32 |
| 8 | 150 | 240/32 | 18 | 110 | 95/16 |
| 9 | 110 | 185/29 | 19 | 110 | 120/19 |
| 10 | 150 | 120/19 | 20 | 150 | 150/24 |

Таблиця 4.10

Питомі параметри заданої ЛЕП

| Варіант | № |
|---------------------------|-------|
| Номінальна напруга мережі | кВ |
| Марка проводу | АС- |
| $r_0 =$ | Ом/км |
| $x_0 =$ | Ом/км |
| $b_0 =$ | См/км |

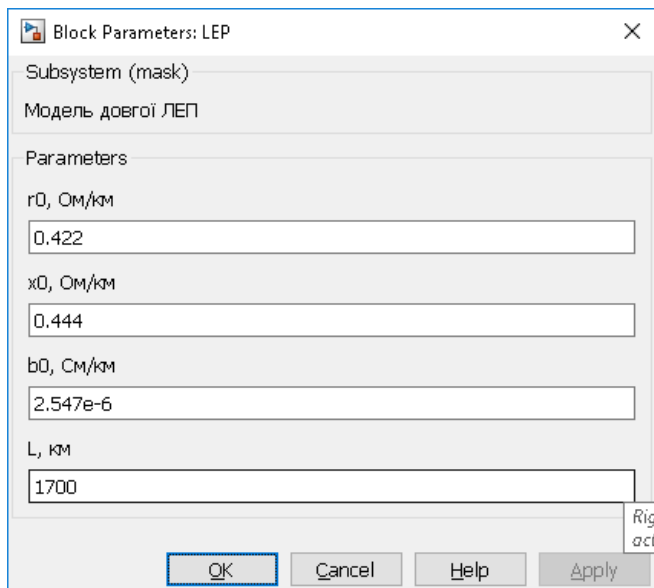
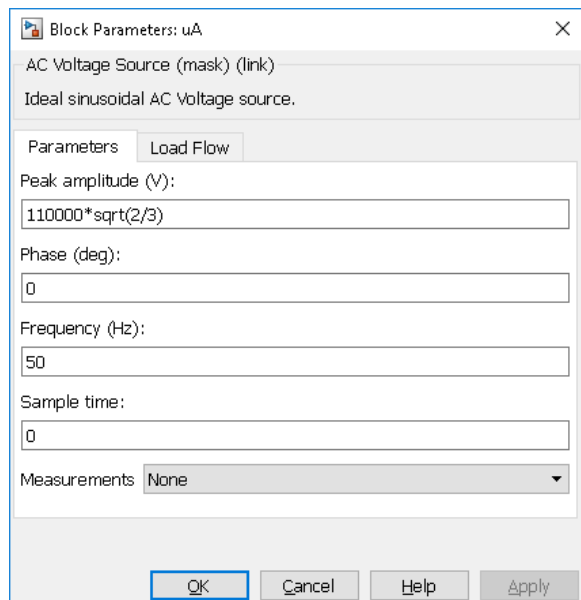
6. Виконати моделювання та занести до табл. 4.11 результати (значення напруг U_1 та U_2). Збільшуючи довжину лінії на 100 км, фіксувати до табл. 4.11 значення напруги U_2 в кінці лінії. Для кожного рядка треба розрахувати величину $|\underline{K}(l)| = \frac{U_2}{U_1}$. Діапазон довжин лінії, для яких проводиться експеримент, має відображати резонансний характер залежності $|\underline{K}(l)|$. Рекомендується зменшити крок зміни довжини лінії в районі екстремуму функції $|\underline{K}(l)|$ для більш точного його дослідження.

7. В одній системі координат побудувати теоретичну залежність модуля $|\underline{K}(l)|$ коефіцієнта передачі лінії в функції довжини згідно з виразом (4.5) та нанести експериментальні точки.

Для цього в командному рядку програми MATLAB необхідно набрати наступні команди (коментарі після % допускається не набирати):

```
%експериментальні дані
len1=[100 200 ...] %внести довжини лінії з табл. 19.3
k1=[ ... ... ] %внести відповідні довжинам значення
%коефіцієнта передачі з табл. 19.3

%теоретична залежність
r0=0.422 %внести значення згідно з табл. 19.2
x0=0.444 %внести значення згідно з табл. 19.2
b0=2.547e-6 %внести значення згідно з табл. 19.2
len2=10:50:2000 %діапазон довжин лінії
%з 10 з кроком 50 до 2000, км
k2=abs(1./cosh(len2.*sqrt((r0+j*x0)*j*b0)))
%побудова графіку
plot(len1,k1,'.r',len2,k2,'-b'),grid on
```



а)

б)

Рис. 4.20. Вікна налаштувань параметрів джерела напруги uA (а) та моделі ЛЕП (б)

Таблиця 4.11

Результати експерименту

| Виміряно | | Розраховано |
|---------------------------------|-------------------|--|
| $U_1 = \text{_____} \text{ кВ}$ | | $ \underline{K}(l) = \frac{U_2}{U_1}$ |
| $l, \text{ км}$ | $U_2, \text{ кВ}$ | |
| 100 | | |
| 200 | | |
| 300 | | |
| | | |

При цьому слід мати на увазі, що кінець діапазону довжини лінії, який в програмі дорівнює 2000 км, може бути змінений залежно від параметрів конкретної ЛЕП. Слід підбирати цю величину таким чином, щоб відслідкувати резонансні процеси в системі

8. За отриманим графіком проаналізувати відповідність теоретичних результатів експериментальним даним. Також встановити, які довжини заданої ЛЕП є критичними з точки зору виникнення перенапруг.

4.6.4. Вміст звіту з лабораторної роботи

1. Тема, мета роботи.
2. Загальний вигляд віртуального лабораторного стенда.
3. Вихідні дані згідно з варіантом.
4. Табл. 4.10 з питомими параметри заданої ЛЕП.
5. Табл. 4.11 з результатами експерименту.
6. Графік теоретичної залежності модуля $|K(l)|$ коефіцієнта передачі лінії в функції довжини з нанесеними експериментальними точками.
7. Висновки.

4.6.5. Питання для самоперевірки

1. Чи підвищується напруга в кінці розімкненої лінії, яка підключена до джерела живлення?
2. Яке співвідношення зв'язує напругу на початку розімкненої лінії з напругою в кінці цієї ЛЕП?
3. Що називається зарядною потужністю ЛЕП?
4. Що називається коефіцієнтом передачі ЛЕП?
5. Який характер носить залежність коефіцієнта передачі лінії від її довжини?
6. Як визначається стала розповсюдження ЛЕП?

ГЛОСАРІЙ

А

Автоелектронна емісія (холодна, тунельна, електростатична, польова емісія) – випромінювання електронів з катода під дією зовнішнього електричного поля, при цьому електрони проникають крізь потенційний бар'єр, який існує на поверхні катода.

Автоматичне повторне ввімкнення (АПВ) – один із засобів електроавтоматики, що повторно вмикає відключений релейним захистом силовий комутаційний апарат через визначений час, за який більшість дугових замикань самоліквідуються і електрична міцність ізоляції відновлюється; використання АПВ забезпечує безперебійність електропостачання.

Б

Блискавкоприймач – частина блискавичника, призначена для перехоплення блискавок; слугує для прийому розряду блискавки й розташовується в зоні можливого контакту з каналом блискавки.

В

Вакуум – середовище, яке містить газ при тиску, що є суттєво меншим від атмосферного.

Вакуумна дуга – електричний розряд між двома металічними контактами у вакуумі, що характеризується відносно великими струмами (до десятків кА) і низькою напругою (десятки В); підтримується за рахунок металу, що випаровується з поверхні контактів до вакуумного проміжку.

Вакуумний вимикач – високовольтний вимикач (до 220 кВ включно), в якому вакуум використовується як середовище для гасіння електричної дуги.

Варистор – напівпровідниковий резистор, електричний опір (провідність) якого нелінійно залежить від прикладеної електричної напруги.

Вентильний розрядник – апарат для обмеження перенапруг, який підключається до електричної мережі через іскрові проміжки та робочі елементи якого виготовлені на основі нелінійних резисторів (варисторів).

Вибухова електронна емісія – термоелектронна емісія з ділянок катода, нагрітих до високих температур за рахунок мікробибухів.

Внутрішні перенапруги – перенапруги, що виникають в результаті різноманітних нормальних або аномальних комутацій в системі.

Г

Газовий розряд – сукупність процесів, що виникають внаслідок протікання електричного струму через речовину, що знаходиться в газоподібному стані.

Головна ізоляція обмоток – ізоляція від обмотки до заземлених частин магнітопроводу, баку і інших обмоток (у тому числі і інших фаз) електричної машини.

Грозові перенапруги – перенапруги, що пов'язані з розрядами блискавки в струмопровідні частини установки або в землю поблизу неї.

Д

Дугогасний реактор (катушка Петерсена) – електричний апарат (індуктивність), що призначений для компенсації ємнісних струмів замикань на землю в мережах з ізольованою нейтраллю.

Е

Екзоелектронна емісія – емісія електронів з поверхні металічних і неметалічних кристалів після механічних впливів на неї, а також ультрафіолетовими або рентгенівськими променями або тліючим розрядом (іноді називається "ефектом Крамера"). За відсутності спеціальної обробки електродів щільність струму екзоелектронів з катода не перевищує $100 \div 1000$ ел/(см²·с). Такий струм може вплинути тільки на процес пробою під дією мілісекундних імпульсів.

Ектон – лавина (пакет, порція) електронів, що здійснюють емісію з металу за рахунок механізму вибухової електронної емісії.

Елегаз (скорочення від «електричний газ») – шестифториста сірка, SF₆, неорганічна речовина, один з флуоридів сірки, при нормальних умовах – важкий газ, в 5 разів важчий за повітря; завдяки високій електричній міцності широко використовується в високовольтній електротехніці як діелектрик.

Електрична ізоляція – конструктивна частина електричного устаткування, що має діелектричні властивості.

Електричний вибух металу – це різка зміна фізичного стану металу в результаті інтенсивного виділення в ньому джоулевої енергії при пропусканні імпульсу струму великої щільності ($10^6 \div 10^9$ А/см²).

Електролюмінесценція – різновид люмінесценції, світіння газів під час проходження через них електричного струму.

З

Заземлювач блискавкозахисту – провідник або кілька з'єднаних між собою провідників, що мають електричний контакт з ґрунтом; може являти собою, наприклад, заглиблену в ґрунт металеву плиту.

Захисні розрядники – захисні апарати, що забезпечують не лише захист ізоляції від перенапруг, але і гасіння дуги супроводжуючого струму протягом часу меншого, ніж час дії релейного захисту.

І

Ізоляційний бар'єр – конструкція з твердого ізоляційного матеріалу (найчастіше використовується плаский електрокартон завтовшки 5 мм), що встановлюються в оливі між електродами електричного апарату, дуже широко застосовується для підвищення електричної міцності оливної ізоляції.

Інженерно-технологічний інститут (англ. The Institution of Engineering and Technology, IET) – найбільша інженерна спільнота в Європі, утворена злиттям Інституту інженерів-електротехніків (ІЕЕ) та Організації об'єднаних інженерів (ІЕ). Нараховує 150 тис. членів у всьому світі. Офіційний сайт www.theiet.org.

Інститут інженерів з електротехніки та електроніки (англ. Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) – міжнародна організація інженерів у галузі електротехніки, радіоелектроніки та радіоелектронної промисловості. Світовий лідер в галузі розроблення стандартів з електроніки та електротехніки. Офіційний сайт <http://www.ieee.org/>.

К

Координація ізоляції – узгодження характеристик захисних пристроїв і характеристик ізоляції з метою забезпечення високих показників надійності останньої.

Коронний розряд – самостійний розряд у газах, що виникає в сильних неоднорідних електричних полях навколо електродів із великою кривиною (вістря, тонкі дроти).

Л

Лідер – розряд, що слабо світиться, який прокладає шлях для основного розряду рухаючись від одного електроду до іншого; лідер перекриває

розрядний проміжок і сполучає електроди безперервним провідним каналом; утворюється із стримера при швидкості до 10^8 см/с.

Лінійна низхідна блискавка – декілька іскрових розрядів (імпульсів, компонентів блискавки) між хмарою і землею, що слідує один за одним.

М

Міжнародна електротехнічна комісія (МЕК; англ. International Electrotechnical Commission, IEC) — міжнародна організація із стандартизації у сфері електричних, електронних і суміжних технологій. Деякі із стандартів МЕК розробляються спільно з Міжнародною організацією із стандартизації (ISO). Офіційний сайт <http://www.iec.ch/>. Україна є членом IEC з 1993 року, коли було створено Національний електротехнічний комітет України (секретаріат веде Національний орган стандартизації – ДП "УкрНДНЦ" www.ukrndnc.org.ua).

Н

Несамостійний розряд – струм в газі, що протікає в умовах дії зовнішньої іонізації, усунення якої призводить до припинення струму.

О

Об'ємний заряд – розподілений некомпенсований електричний заряд одного знаку.

Обмежувач перенапруг нелінійний – апарат для обмеження перенапруг, який підключається до електричної мережі без іскрових проміжків та робочі елементи якого виготовлені на основі високонелінійних металооксидних резисторів (варисторів).

П

Перекриття ізоляції – розряд по поверхні ізоляційного матеріалу, після ліквідації електричної дуги ізоляційний матеріал в більшості випадків зберігає свої діелектричні властивості.

Перенапруга – тимчасове підвищення напруги понад найбільшу допустиму робочу напругу електроустановки.

Плазма – іонізований, електрично-квазінейтральний стан речовини.

Подовжня ізоляція – це ізоляція між різними точками однієї обмотки (між витками, шарами, котушками) електричної машини.

Пробій ізоляції – безповоротна втрата ізоляцією діелектричних властивостей з утворенням стумопровідного каналу високої провідності.

Р

Режимні перенапруги – перенапруги, що спостерігаються при несприятливих поєднаннях електрорушійних сил, які діють в мережі; включають перенапруги при несиметричному короткому замиканні на землю, а також при перезбудженні і розгоні генератора, які виникають у разі раптового скидання навантаження.

Резонансні перенапруги – перенапруги, що мають місце при наближенні однієї з власних частот коливань окремих ділянок мережі до частоти вимушеної електрорушійної сили; можуть виникнути при односторонньому живленні лінії електропередачі, в нейтралі і фазах мережі з дугогасним реактором внаслідок резонансу в контурі, що складається з його індуктивності і ємності мережі на землю.

Розрядник довгоіскровий – апарат для захисту від перенапруг, принцип дії якого заснований на використанні ефекту ковзного розряду, який забезпечує велику довжину імпульсного перекриття по поверхні розрядника, і запобігання за рахунок цього переходу імпульсного перекриття в силову дугу струму промислової частоти.

С

Самостійний розряд – струм в газі, що протікає при прикладанні до електродів деякої граничної напруги, величина якої залежить від зовнішніх умов: тиску і сорту газу, конфігурації електродів, довжини проміжку, зовнішнього опромінення тощо.

Старіння ізоляції – процес поступового погіршення діелектричних властивостей ізоляції, що спостерігається при тривалій експлуатації; завершується пробоем ізоляції.

Стример – тонкі розгалужені канали, що тьмяно світяться та містять іонізовані атоми газу і відщепнуті від них вільні електрони; стримери утворюються в електричному полі розрядного проміжку з електронних лавини.

Струмозводи – провідники, що слугують для відводу заряду від блискавкоприймача до заземлювача; можуть бути природними (наприклад, арматура залізобетонних будівельних конструкцій об'єкта захисту) або штучними (провідники досить великого перерізу).

Супроводжуючий струм – струм, що спрямовується через іскровий проміжок услід за імпульсним струмом по іонізованому шляху, обумовлений напругою промислової частоти.

Т

Таунсендівський розряд – квазістаціонарний електричний розряд у газах при низькому тиску (декілька мм.рт.ст.) та дуже малих струмах (менше 10^{-5} А), розряд може бути як самостійним, так і несамостійним; електричне поле в розрядному проміжку однорідне або слабонеоднорідне, не викривлюється просторовим зарядом, який є незначним; названий на честь вченого Таунсенда, який розробив теорію електронних лавин.

Ф

Ферорезонансні перенапруги – перенапруги, що можуть розвиватися в контурах, які містять ємність і індуктивність з насиченим магнітопроводом; спостерігаються як на промисловій частоті, так і на вищих і нижчих гармоніках.

Фібробакеліт – газогенеруючий матеріал, що використовується в трубчастих розрядниках.

Ч

Часткові розряди – пробої дефектів ізоляції (повітряних крапель, прошарків оливи тощо), електрична міцність яких нижче твердої фази; призводить до пробою тільки ослабленої частки, а не всього ізоляційного проміжку, проте тривала дія часткових розрядів викликає старіння та може призвести пробою ізоляції.

ЛІТЕРАТУРА

- 1 Техніка і електрофізика високих напруг : навч. посібник / Бржезицький В. О. та ін. ; за ред. В. О. Бржезицького та В. М. Михайлова. Харків : НТУ «ХПІ». Торнадо, 2005. 930 с.
- 2 Координация изоляции и перенапряжения в электрических высоковольтных сетях : учеб. пособ. / Гуль В. И. и др. ; под. ред. проф. Гуля В. И. Харьков : ЭДЭНА, 2009. 270 с.
- 3 Техника высоких напряжений : учеб. пособ. для вузов / Богатенков И. М. и др. ; под. ред. Г. С. Кучинского. СПб : Изд. ПЭИПК, 1998. 700 с.
- 4 Базуткин В. В., Ларионов В. П., Пинталь Ю. С. Техника высоких напряжений: Изоляция и перенапряжения в электрических системах : учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Энергоатомиздат, 1986. 464 с.
- 5 Месяц Г. А. Импульсная энергетика и электроника. М. : Наука, 2004. 704 с.
- 6 Техника высоких напряжений : учеб. пособие / Бутенко В. А. и др. Томск : Изд-во ТПУ, 2010. 119 с.
- 7 Arora R., Mosch W. High voltage and electrical insulation engineering. Hoboken, New Jersey, USA : John Wiley & Sons, Inc., 2011. 392 p.
- 8 Farouk A. M. Rizk, Giao N. Trinh High voltage engineering. Boca Raton, Florida, USA : CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014. 804 p.
- 9 High-voltage engineering and testing. 3rd ed., edited by Hugh M. Ryan. London : The Institution of Engineering and Technology, 2013. 960 p.
- 10 Wadhwa C. L. High voltage engineering / Wadhwa C. L., 2d ed. New Delhi: New Age International (P) Limited, publishers, 2007. 312 p.
- 11 Advances in high voltage engineering. Edited by A. Haddad and D. F. Warne. London : The Institution of Engineering and Technology, 2007. 669 p.
- 12 Справочник по проектированию электрических сетей ; под ред. Д. Л. Файбисовича. 4-е изд., перераб. и доп. М. : ЭНАС, 2012. 376 с.

Навчальне видання

Василець Святослав Володимирович
Василець Катерина Сергіївна

ТЕХНІКА ВИСОКИХ НАПРУГ

Навчальний посібник